

TUGAS AKHIR - TM 141585

PEMODELAN DAN ANALISIS SIMULATOR GEMPA BUMI PENGHASIL GERAK ROTASI

Muhammad Fadli Amahoru
NRP 2112 100 114

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng.

JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017



TUGAS AKHIR – TM141585

**PEMODELAN DAN ANALISIS SIMULATOR GEMPA
BUMI PENGHASIL GERAK ROTASI**

MUHAMMAD FADLI AMAHORU
NRP. 2112100114

Dosen Pembimbing:
Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng.

PROGRAM SARJANA
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017



FINAL PROJECT – TM141585

**MODELLING AND ANALYSIS OF EARTHQUAKE
SIMULATOR WITH ROTATIONAL MOTION
OUTPUT**

MUHAMMAD FADLI AMAHORU
NRP. 2112100114

Advisory Lecturer
Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng.

BACHELOR PROGRAM
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2017

PEMODELAN DAN ANALISIS SIMULATOR GEMPA BUMI PENGHASIL GERAK ROTASI

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

MUHAMMAD FADLI AMAHORU

NRP. 2112 100 114

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Eng. Harus Laksana G. ST, M.Eng. (Pembimbing)
NIP. 197505111999031001
2. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT (Penguji I)
NIP. 197004121997032003
3. Aida Annisa Amin Daman, ST, MT (Penguji II)
NIP. 198907052015042005



SURABAYA

JANUARI, 2017

PEMODELAN DAN ANALISIS SIMULATOR GEMPA BUMI PENGHASIL GERAK ROTASI

Nama Mahasiswa : Muhammad Fadli Amahoru
NRP : 2112100114
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr.Eng Harus Laksana Guntur ST.,
M.Eng.

ABSTRAK

Beban-beban dinamik yang merusak struktur bangunan umumnya adalah beban-beban alam seperti beban gempa yang sulit diukur baik jenis maupun besarnya. Dimensi dan geometri struktur yang tidak tepat dapat memperbesar getaran yang terjadi akibat terjadinya resonansi dan ketidakmampuan struktur bangunan untuk menerima beban-beban dinamik tersebut, sehingga performa bangunan menjadi sangat rendah dan dapat mengakibatkan kerusakan struktural yang tidak diharapkan.

Dalam tugas akhir ini dilakukan pemodelan dan simulasi dari rancangan simulator gempa bumi dengan memanfaatkan mekanisme engkol dengan *shaking table* menghasilkan gerak rotasi yang akan diberikan ke beban gedung sebagai beban dinamika. Parameter-parameter yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah amplitudo meja getar (*shaking table*) sebesar 5 mm-20 mm, frekuensi getaran yaitu 18.6 rad/s dan 25.2 rad/s , serta beban gedung (*load*) yang terdiri dari 10 kg, 30 kg, dan 50 kg.

Dari simulasi simulator gempa bumi penghasil gerak rotasi didapatkan dengan adanya perubahan nilai amplitudo, maka panjang jari-jari *disc* akan terjadi perubahan nilai dimana panjang jari-jari pulley sama dengan setengah nilai dari amplitudo. Nilai redaman yang dibutuhkan agar gaya yang ditransmisikan ke lantai bernilai kecil adalah sebesar 67040.595 N.s/m. Hasil respon dinamis pada *shaking table* berupa percepatan sudut, kecepatan sudut, dan perpindahan sudut dengan variasi jari-jari *disc* didapatkan bahwa semakin besar nilai r , maka semakin besar pula

respon dinamis yang didapatkan. Pada respon dinamis gedung berupa percepatan sudut, kecepatan sudut, perpindahan sudut, percepatan linear, kecepatan linear dan perpindahan linear dengan variasi jari-jari *disc* didapatkan bahwa semakin besar nilai r , maka semakin besar pula respon dinamis yang didapatkan. Lalu dengan variasi frekuensi motor didapatkan respon dinamis pada *shaking table* berupa percepatan sudut, kecepatan sudut, dan perpindahan sudut bahwa semakin besar nilai ω , maka semakin besar pula respon yang dihasilkan. Pada respon dinamis gedung berupa percepatan sudut, kecepatan sudut, perpindahan sudut, percepatan linear, kecepatan linear dan perpindahan linear dengan variasi frekuensi motor didapatkan bahwa semakin besar nilai ω , maka semakin besar pula respon dinamis yang didapatkan. Selanjutnya dengan variasi massa gedung didapatkan respon dinamis pada *shaking table* berupa percepatan sudut, kecepatan sudut, dan perpindahan sudut bahwa variasi m tidak terlalu berpengaruh terhadap respon dinamis yang dihasilkan. Namun berbanding terbalik pada respon dinamis gedung. Semakin besar nilai m , maka semakin kecil respon yang didapatkan.

Kata kunci : beban dinamik, simulator gempa bumi, mekanisme engkol, respon dinamis, *shaking table*, parameter, redaman motor.

MODELLING AND ANALYSIS OF EARTHQUAKE SIMULATOR WITH ROTATIONAL MOTION OUTPUT

Name : Muhammad Fadli Amahoru
NRP : 2112100114
Major : Mechanical Engineering FTI-ITS
Academic Supervisor : Dr.Eng. Harus Laksana Guntur ST.,
M.Eng.

ABSTRACT

The dynamic loads that cause damage of the building structure generally are nature loads such as earthquake loads are difficult to measure both the type and the magnitude. The dimension and geometry of the structure that are imprecise can increase the vibration that caused by the resonance and inability of the building structure to hold the dynamic loads, so the performance of the building would be very low and can cause undesirable structural damage.

In this final project, present the modeling and simulation of earthquake simulator by using the crank mechanism with shaking table generating rotational motion that will given to the building load as a dynamic loads. The parameters used in this final project are amplitude of the shaking table is 5 mm-20mm, the frequency of vibration is 18.7 rad/s and 25.2 rad/s, and the building load consist of 10 kg, 30 kg, and 50 kg.

From the simulation of the earthquake simulator generating rotational motion obtained that, by the change of the amplitude value, the length of the disc radius would be changing, as well as the length of the pulley radius is equal to half of the amplitude value. The motor damping value that needed so that the trasmitted force on the floor is small should be 67040.59 N.s/m.. The value of the dynamic response from the shaking table is angular accelaration, angular velocity, and angular displacement with the variation of the disc radius obtained that the greater value of r would generate the greater dynamic reseponse too. The value

of the dynamic response from the building is angular acceleration, angular velocity, angular displacement, linear acceleration, linear velocity, and linear displacement with variation of the disc radius obtained that the greater value of r would generate the greater dynamic response. Then, with the variation of motor frequency, the dynamic response of the shaking table in the form of angular acceleration, angular velocity, and angular displacement obtained that the greater value of ω , would generate greater response too. The value of the dynamic response from the building is angular acceleration, angular velocity, angular displacement, linear acceleration, linear velocity, and linear displacement with the variation of motor frequency obtained that the greater value of ω , would generate greater response too. Then, with the variation of the building mass, the dynamic response of the shaking table in the form of angular acceleration, angular velocity, and angular displacement obtained that the variation of m is not affect too much to the dynamic response. But inversly proportional to the dynamic response of the building. The greater value of m , would generate smaller response.

Keywords : *dynamic load, earthquake simulator, slider crank mechanism, the dynamic response, shaking table, parameter, motor damping.*

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahahirabbil'alamin, segala puji hanya Allah subhanahuwata'ala dan sholawat serta salam semoga senantiasa tercurahkan kepada Nabi Muhammad shallallahu'alaihiwasallam. Dengan rahmat dari Allah subhanahuwata'ala, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini yang berjudul **“PEMODELAN DAN ANALISIS SIMULATOR GEMPA BUMI PENGHASIL GERAK ROTASI”** ini dengan baik.

Dalam penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis hendak mengucapkan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Orang tua penulis, Deswati dan Ridwan Amahoru, kedua kakak penulis Zulfahri Amahoru dan Firdaus Amahoru, kedua kakak ipar penulis Rini dan Ririn, yang telah mendoakan dan selalu memberikan dukungan penulis dalam keadaan apapun serta ketiga keponakan penulis Izan, Zhafran, dan Izan yang membuat penulis selalu bersemangat dalam mengerjakan tugas akhir.
2. Bapak Dr.Eng. Harus Laksana Guntur ST., M.Eng. sebagai dosen pembimbing yang selalu memberikan bimbingan, dukungan, dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Ibu Dr. Wiwiek Hendrowati ST.,MT., Ibu Aida Annisa Amin Daman ST., MT., dan Bapak Moch. Solichin ST., MT., sebagai dosen penguji seminar dan siding yang memberikan banyak saran kepada penulis.
4. Seluruh dosen jurusan Teknik Mesin FTI ITS yang telah mendidik dan mengajarkan ilmu pengetahuan kepada penulis.
5. Seluruh karyawan jurusan Teknik Mesin FTI ITS yang telah membantu kelancaran penyelesaian Tugas Akhir ini.
6. Teman-teman mahasiswa Teknik Mesin FTI ITS angkatan 2012 (M-55) yang sudah menemani dan memberikan kenangan dari awal semester 1 sampai sekarang.

7. Teman-teman seperjuangan Tugas Akhir di Laboratorium Sistem Dinamis dan Vibrasi (Fauzi, Wando, Cubex, Bella, Ayu, Betari, Didin, Mandut, Pindi) yang sama-sama berjuang menuju wisuda 115
8. Teman-teman kambing tapanuli (Moses, Azis, Ando, Gilas, Rian, Adro, Riva, Wahid, Eden, Dll) yang meluangkan waktu untuk main futsal sambil refresing dari mengerjakan tugas akhir.

Akhirnya, semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan para pembaca pada umumnya, sebagai bentuk sumbangsi penulis untuk kemajuan bangsa Indonesia. Penulis menyadari kekurangan yang ada pada Tugas Akhir ini, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan untuk kesempurnaan Tugas Akhir ini.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
<i>ABSTRACT</i>	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Alat Uji Gempa	5
2.1.1 Sistem 6-DOF <i>Servohydraulic Shaking Tables</i>	5
2.2 Getaran	6
2.3 Sistem diskrit multi-DOF	7
2.4 Redaman	9
2.4.1 Sistem Isolasi Seismik Pada Struktur Bangunan dengan Menggunakan Bantalan Karet	10
2.4.2 Sistem Isolasi Seismik dengan Menggunakan Bola Baja	14
2.4.3 Peredam Getaran Bangunan dengan Model Empat Tumpuan	16
Mekanisme Gerak Engkol	20

2.5	Perhitungan Daya pada Motor	22
2.6	<i>Force Transmissibility</i>	23
2.7	<i>Displacement Transmissibility</i>	26
BAB III METODOLOGI		29
3.1	Metode Penelitian	29
3.2	Tahap Studi Literatur	31
3.3	Pemodelan Fisik Rancangan Simulator Gempa Bumi Penghasil Gerak Rotasi	32
3.4	Perancangan, Pemodelan, dan Simulas Penggerak Mekanisme Engkol dengan Variasi Amplitudo Dan Frekuensi	33
3.4.1	Perancangan Dimensi Penggerak Mekanisme Engkol dengan Variasi Amplitudo	33
3.4.2	Persamaan Matematis Sistem Penggerak Mekanisme Engkol dengan Variasi Amplitudo dan Frekuensi	35
3.4.3	Analisa Grafik Sistem Penggerak Mekanisme Engkol	41
3.5	Pemodelan dan Simulasi Rancangan Pemodelan dan Analisis Simulator Gempa Bumi Penghasil Gerak Rotasi	41
3.5.1	Pemodelan Matematis dan Pembuatan Persamaan Dari Rancangan Pemodelan dan Analisis Simulator Gempa Bumi Penghasil Gerak Rotasi	41
3.6	Penentuan Redaman pada Motor	42
3.5.2	Pembuatan Blok Simulasi Rancangan Simulator Gempa Bumi Penghasil Gerak Rotasi	43
3.5.3	Analisa Grafik Rancangan Simulator Gempa Bumi Penghasil Gerak Rotasi Menggunakan Sistem Penggerak Mekanisme Engkol	44

BAB IV PEMODELAN SISTEM.....	47
4.1 Dimensi Gedung dan <i>Shaking Table</i>	47
4.2 Pemodelan Dinamis Sistem Mekanisme Engkol	49
4.3 Pengaruh Perubahan Variasi Amplitudo terhadap Jari-Jari <i>Disc</i>	55
4.3.1 Data Gambar <i>Connecting Rod</i> pada Inventor.....	56
4.3.2 Data Gambar <i>Disc</i> pada Inventor	56
4.4 Pengaruh Perubahan Frekuensi Getar terhadap Jari-Jari <i>Disc</i>	57
4.5 Pemodelan Dinamis Sistem Simulator Gempa Bumi ..	58
4.6 Perhitungan Daya Motor	64
4.7 Perhitungan Redaman Motor	66
4.8 Diagram Blok.....	68
BAB V ANALISA DAN PEMBAHASAN	69
5.1 Variasi Kecepatan dan Jari-Jari <i>Disc</i> Terhadap <i>Input</i> Gaya Mekanisme Engkol	69
5.2 Respon Dinamis Simulator Gempa Bumi dengan Variasi Jari-Jari <i>Disc</i>	71
5.3 Respon Dinamis Simulator Gempa Bumi dengan Variasi Frekuensi Motor	75
5.4 Respon Dinamis Simulator Gempa Bumi dengan Variasi Massa Gedung	78
5.5 Kompilasi Hasil	82
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN.....	93
6.1 Kesimpulan	93
6.2 Saran	94
DAFTAR PUSTAKA.....	97

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Alat Uji Gempa Skala Besar ^[6]	5
Gambar 2. 2 Pemodelan fisik penempatan hydraulic ^[6]	6
Gambar 2. 3 Pemodelan matematis pada sebuah <i>hydraulic</i> yang bekerja ^[6]	6
Gambar 2. 4 Contoh sederhana dari sistem <i>free vibration with damping</i>	7
Gambar 2. 5 Contoh sederhana dari sistem <i>forced vibration with damping</i>	7
Gambar 2. 6 Sistem getaran multi derajat kebebasan.....	8
Gambar 2. 7 <i>Free body diagram</i> multi derajat kebebasan	8
Gambar 2. 8 Diagram Stress-Strain ^[7]	10
Gambar 2. 9 Alat Uji Gempa dengan mekanisme engkol ^[3]	11
Gambar 2. 10 Respon simpangan struktur dengan isolator-1 akibat percepatan dasar gempa El Centro N-S: (a) DOF-1, (b) DOF-2, (c) DOF-3 ^[3]	12
Gambar 2. 11 Respon simpangan struktur dengan isolator-2 akibat percepatan dasar gempa El Centro N-S: (a) DOF-1, (b) DOF-2, (c) DOF-3 ^[3]	13
Gambar 2. 12 Respon simpangan struktur dengan isolator-3 akibat percepatan dasar gempa El Centro N-S: (a) DOF-1, (b) DOF-2, (c) DOF-3 ^[3]	14
Gambar 2. 13 Foto fisik alat uji gempa bumi dengan mekanisme engkol ^[4]	14
Gambar 2. 14 Pemodelan fisik alat uji gempa bumi dengan mekanisme engkol ^[4]	15
Gambar 2. 15 Model fisis bangunan dengan model empat tumpuan ^[5]	17
Gambar 2. 16 Respon getaran bangunan dengan nilai konstanta pegas (k) 1.02×10^4 N/m ^[5]	18

Gambar 2. 17 Respon getaran bangunan dengan nilai konstanta pegas (k) $1.02 \times 10^{15} \text{ N/m}^{[5]}$	18
Gambar 2. 18 Respon getaran bangunan dengan nilai damper (c) $2.04 \times 10^{10} \text{ N.s/m}^{[5]}$	19
Gambar 2. 19 Respon getaran bangunan dengan nilai damper (c) $2.04 \times 10^5 \text{ N.s/m}^{[5]}$	19
Gambar 2. 20 Respon getaran bangunan dengan nilai massa bangunan 820896 kg dan $985075 \text{ kg}^{[5]}$	20
Gambar 2. 21 Mekanisme Engkol ^[1]	20
Gambar 2. 22 Maksimum percepatan slider untuk mekanisme engkol	21
Gambar 2. 23 <i>Force Transmissibility untuk Motion of Base</i> ^[1]	23
Gambar 2. 24 <i>Machine and resilient member on rigid foundation</i>	24
Gambar 2. 25 <i>Force Transmissibility untuk Base Isolation</i> ^[1]	25
Gambar 2. 26 <i>Displacement transmissibility dan Phase Angle</i> ^[1]	26
Gambar 2. 27 <i>Displacement transmissibility for Base Isolation of Rigid Foundation</i> ^[1]	27
Gambar 3. 1 Diagram alir penyelesaian tugas akhir	30
Gambar 3. 2 Pemodelan fisik rancangan simulator gempa bumi penghasil gerak rotasi.....	33
Gambar 3. 3 Model matematis dari mekanisme engkol	34
Gambar 3. 4 Diagram alir penentuan panjang r dengan variasi amplitude 5 mm , 10 mm , 15 mm , dan 20 mm	35
Gambar 3. 5 Pemodelan matematis pada mekanisme engkol.....	36
Gambar 3. 6 Diagram alir proses persamaan matematis dari sistem penggerak mekanisme engkol dengan variasi amplitudo 0.005 m dan frekuensi.....	37
Gambar 3. 7 Diagram alir proses persamaan matematis dari sistem penggerak mekanisme engkol dengan variasi amplitudo 0.01 m dan frekuensi.....	38

Gambar 3. 8 Diagram alir proses persamaan matematis dari sistem penggerak mekanisme engkol dengan variasi amplitudo 0.015 m dan frekuensi.....	39
Gambar 3. 9 Diagram alir proses persamaan matematis dari sistem penggerak mekanisme engkol dengan variasi amplitudo 0.02 m dan frekuensi.	40
Gambar 3. 10 Diagram alir menentukan redaman pada motor....	42
Gambar 3. 11 Diagram alir pembuatan blok diagram Simulink dari sistem simulator gempa bumi penghasil gerak rotasi	44
Gambar 4. 1 (a) Dimensi gedung, (b) 3D pada Inventor	47
Gambar 4. 2 Gambar 3D shaking table pada Inventor	48
Gambar 4. 3 Pemodelan matematis pada mekanisme engkol	49
Gambar 4. 4 <i>Free body diagram</i> pada M_r	50
Gambar 4. 5 <i>Free body diagram</i> pada M_l	51
Gambar 4. 6 <i>Free body diagram</i> pada M_T	53
Gambar 4. 7 Hasil 3D <i>connecting rod</i>	56
Gambar 4. 8 Hasil 3D <i>disc</i>	57
Gambar 4. 9 Model matematis dari sistem rancangan pemodelan dan analisis simulator gempa bumi penghasil gerak rotasi	59
Gambar 4. 10 <i>Free body diagram</i> pada M_T	59
Gambar 4. 11 <i>Free body diagram</i> pada M_L	60
Gambar 4. 12 <i>Free body diagram</i> pada M_m	62
Gambar 4. 13 FBD pada simulator gempa bumi	65
Gambar 4. 14 Diagram blok pada sistem simulator gempa bumi.....	68
Gambar 5. 1 Grafik F_o dengan variasi jari-jari <i>disc</i>	69
Gambar 5. 2 Grafik F_o dengan variasi frekuensi	70
Gambar 5. 3 Grafik respon dinamis pada simulator gempa bumi (a) percepatan sudut shaking table, (b) kecepatan sudut shaking table, (c) perpindahan sudut shaking table, (d)	

percepatan sudut gedung, (e) kecepatan sudut gedung, (f) perpindahan sudut gedung, (g) percepatan linear gedung, (h) kecepatan linear gedung, dan (i) perpindahan linear gedung dengan variasi jari-jari *disc*73

Gambar 5. 4 Grafik respon dinamis pada simulator gempa bumi (a) percepatan sudut shaking table, (b) kecepatan sudut shaking table, (c) perpindahan sudut shaking table, (d) percepatan sudut gedung, (e) kecepatan sudut gedung, (f) perpindahan sudut gedung, (g) percepatan linear gedung, (h) kecepatan linear gedung, dan (i) perpindahan linear gedung dengan variasi frekuensi77

Gambar 5. 5 Grafik respon dinamis pada simulator gempa bumi(a) percepatan sudut shaking table, (b) kecepatan sudut shaking table, (c) perpindahan sudut shaking table, (d) percepatan sudut gedung, (e) kecepatan sudut gedung, (f) perpindahan sudut gedung, (g) percepatan linear gedung, (h) kecepatan linear gedung, dan (i) perpindahan linear gedung dengan variasi massa gedung.....80

Gambar 5. 6 Grafik root mean square dari respon dinamis simulator gempa bumi (a) percepatan sudut shaking table, (b) kecepatan sudut shaking table, (c) perpindahan sudut shaking table, (d) percepatan sudut gedung, (e) kecepatan sudut gedung, (f) perpindahan sudut gedung, (g) percepatan linear gedung, (h) kecepatan linear gedung, dan (i) perpindahan linear gedung dengan variasi nilai r 86

Gambar 5. 7 Grafik root mean square dari respon dinamis simulator gempa bumi (a) percepatan sudut shaking table, (b)

kecepatan sudut shaking table, (c) perpindahan sudut shaking table, (d) percepatan sudut gedung, (e) kecepatan sudut gedung, (f) perpindahan sudut gedung, (g) percepatan linear gedung, (e) kecepatan linear gedung, dan (f) perpindahan linear gedung dengan variasi massa gedung.....89

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Respon untuk rumah bola berbentuk silinder belah pada frekuensi meja getar ± 151 cpm (± 15.8 rad/s) ^[4]	15
Tabel 2. 2 Respon untuk rumah bola berbentuk silinder belah pada frekuensi meja getar ± 240 cpm (± 25.2 rad/s) ^[4]	15
Tabel 2. 3 Respon untuk rumah bola berbentuk setengah bola pada frekuensi meja getar ± 151 cpm (± 15.8 rad/s) ^[4]	16
Tabel 2. 4 Respon untuk rumah bola berbentuk setengah bola pada frekuensi meja getar ± 240 cpm (± 25.2 rad/s) ^[4]	16
Tabel 3. 1 Parameter untuk simulasi sistem rancangan alat uji gempa bumi	43
Tabel 4. 1 Nilai moment inersia polar dan center of gravity pada gedung	48
Tabel 4. 2 Nilai moment inersia polar dan center of gravity pada shaking table	48
Tabel 4. 3 Perbandingan nilai r terhadap variasi amplitudo	55
Tabel 4. 4 Nilai moment inersia polar dan center of gravity pada connecting rod	56
Tabel 4. 5 Nilai moment inersia polar dan center of gravity pada pulley	57
Tabel 5. 1 Nilai F_0 dengan variasi nilai r	71
Tabel 5. 2 Nilai F_0 dengan variasi frekuensi	71
Tabel 5. 3 Parameter yang digunakan dalam simulasi pada simulator gempa bumi dengan variasi jari-jari disc ..	72
Tabel 5. 4 Respon dinamis pada shaking table dengan variasi nilai r	74
Tabel 5. 5 Respon dinamis pada gedung dengan variasi nilai r ..	74
Tabel 5. 6 Parameter yang digunakan dalam simulasi pada simulator gempa bumi dengan variasi frekuensi	75

Tabel 5. 7 Respon dinamis pada shaking table dengan variasi nilai frekuensi	77
Tabel 5. 8 Respon dinamis pada gedung dengan variasi nilai frekuensi	78
Tabel 5. 9 Parameter yang digunakan dalam simulasi pada simulator gempa bumi dengan variasi massa gedung	79
Tabel 5. 10 Respon dinamis pada shaking table dengan variasi massa gedung	81
Tabel 5. 11 Respon dinamis pada gedung dengan variasi massa gedung.....	81
Tabel 5. 12 Nilai RMS pada shaking table dengan variasi massa gedung =10 kg, $r = 2.5$ mm.....	82
Tabel 5. 13 Nilai RMS pada shaking table dengan variasi massa gedung =10 kg, $r = 5$ mm.....	83
Tabel 5. 14 Nilai RMS pada shaking table dengan variasi massa gedung =10 kg, $r = 7.5$ mm.....	83
Tabel 5. 15 Nilai RMS pada shaking table dengan variasi massa gedung =10 kg, $r = 10$ mm.....	83
Tabel 5. 16 Nilai RMS pada gedung dengan variasi massa gedung =10 kg, $r = 2.5$ mm.....	84
Tabel 5. 17 Nilai RMS pada gedung dengan variasi massa gedung =10 kg, $r = 5$ mm.....	84
Tabel 5. 18 Nilai RMS pada gedung dengan variasi massa gedung =10 kg, $r = 7.5$ mm.....	84
Tabel 5. 19 Nilai RMS pada gedung dengan variasi massa gedung =10 kg, $r = 10$ mm.....	84
Tabel 5. 20 Nilai RMS pada shaking table dengan variasi massa gedung =50 kg, $r = 2.5$ mm.....	88
Tabel 5. 21 Nilai RMS pada gedung dengan variasi massa gedung =50 kg, $r = 2.5$ mm.....	88

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia adalah negara kepulauan yang merupakan daerah rawan gempa yang dilalui oleh tiga jalur gempa dunia. Dengan demikian setiap bangunan di Indonesia harus direncanakan tahan terhadap beban gempa dan beban-beban dinamik lainnya sepanjang umur hidup rencananya. Selain itu peraturan dan standar-standar bangunan menuntut persyaratan keamanan dan kenyamanan yang semakin lama semakin tinggi, sehingga perlu dikembangkan suatu konsep perancangan struktur bangunan yang mampu memberikan keamanan dan kenyamanan baik untuk struktur bangunan itu sendiri maupun untuk pemakai bangunan. Hal ini mengakibatkan semakin pentingnya mempelajari masalah struktur bangunan dan perilaku dinamik struktur yang mengalami beban-beban dinamik.

Beban-beban dinamik yang merusak struktur bangunan umumnya adalah beban-beban alam seperti beban gempa yang sulit diukur baik jenis maupun besarnya. Dimensi dan geometri struktur yang tidak tepat dapat memperbesar getaran yang terjadi akibat terjadinya resonansi dan ketidakmampuan struktur bangunan untuk menerima beban-beban dinamik tersebut, sehingga performa bangunan menjadi sangat rendah dan dapat mengakibatkan kerusakan struktural yang tidak diharapkan. Selain itu getaran yang besar pada struktur bangunan dapat mengganggu fungsi peralatan dan kesehatan manusia yang menempatnya yang padaakhirnya dapat menurunkan kualitas operasi dan kualitas hidup pemakainya. Keamanan dan keandalan struktur seringkali dihubungkan langsung dengan kekakuan dan *massiveness* struktur bangunan. Rancangan konvensional yang konservatif akan menghasilkan struktur yang kaku, yang mengakibatkan buruknya perilaku dinamik dari struktur tersebut.

Berdasarkan hal tersebut di atas, permasalahan yang masih harus dijawab adalah bagaimana merancang suatu bangunan

gedung sehingga benar-benar mampu menahan beban gempa sampai pada taraf yang aman. Sehingga dibutuhkan alat yang mempresntasikan gempa bumi untuk menguji dan mengetahui rancangan suatu bangunan apakah mampu menahan beban gempa bumi sebelum diimplementasikan pada dunia nyata. Maka dibuatlah tugas akhir ini dengan judul *Pemodelan dan Analisis Simulator Gempa Bumi Penghasil Gerak Rotasi*.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut,

1. Bagaimana pengaruh perubahan frekuensi getar dan amplitudo *shaking table* terhadap dimensi mekanisme engkol?
2. Berapakah nilai redaman motor yang digunakan agar gaya yang ditransmisikan ke lantai (*base*) bernilai kecil dengan perubahan frekuensi getar ?
3. Bagaimana respon dinamis dari sistem penggerak mekanisme engkol dengan meja getar (*shaking table*) dan gedung dengan variasi *input* frekuensi motor, amplitudo, dan variasi beban gedung?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut,

1. Mengetahui pengaruh perubahan frekuensi dan amplitudo *shaking table* terhadap dimensi mekanisme engkol.
2. Mendapatkan nilai redaman motor yang digunakan agar gaya yang ditransmisikan ke lantai (*base*) bernilai kecil dengan perubahan frekuensi getar.
3. Mengetahui respon dinamis dari sistem penggerak mekanisme engkol terhadap meja getar (*shaking table*) dan gedung dengan variasi *input* frekuensi motor, amplitudo, dan variasi beban gedung.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut,

1. Parameter yang digunakan dalam simulasi didapat dari refrensi jurnal [3], [4], [5], dan [6]
2. Sistem penggerak mekanisme engkol digerakkan dengan motor.
3. Frekuensi meja getar (*shaking table*) sama dengan frekuensi motor.
4. *Base* yang digunakan adalah *rigid foundation*.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut,

1. Memberikan informasi mengenai pengaruh perubahan frekuensi dan amplitudo *shaking table* terhadap dimensi mekanisme engkol.
2. Memberikan informasi mengenai nilai redaman motor yang digunakan agar gaya yang ditransmisikan ke lantai (*base*) bernilai kecil dengan perubahan frekuensi getar.
3. Memberikan informasi mengenai respon dinamis dari sistem penggerak mekanisme engkol dengan meja getar (*shaking table*), gedung, dan motor dengan variasi *input* frekuensi motor, amplitudo, dan variasi beban gedung.
4. Pemodelan dapat digunakan sebagai refrensi bilamana tugas akhir ini dilanjutkan sebagai rancang bangun alat uji gempa bumi.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Alat Uji Gempa

Alat uji gempa yang biasanya digunakan untuk mengetahui respon suatu struktur bangunan terdiri dari satu meja getar dan penggerak seperti motor maupun aktuator hidrolik. Alat uji tersebut didesain dalam skala besar dan kecil. Skala besar digunakan untuk benar-benar mengetahui respon struktur bangunan terhadap *input* eksitasi gempa. Struktur bangunan yang biasanya diuji adalah struktur kerangka beton gedung yang memiliki banyak lantai seperti yang terlihat pada gambar 2.1

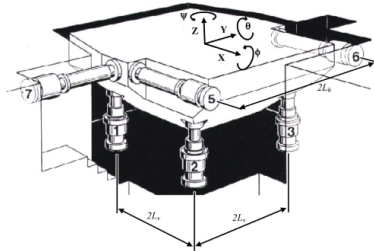


Gambar 2. 1 Alat Uji Gempa Skala Besar^[6]

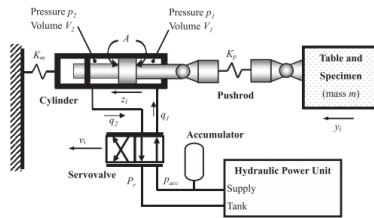
2.1.1 Sistem 6-DOF *Servohydraulic Shaking Tables*

Penelitian mengenai simulator gempapernah dilakukan oleh A.R. Plummer, 2016 yang berjudul “*Model-Based Motion Control for Multi-Axis Servohydraulic Shaking Tables*”^[6]. Pada penelitian ini difokuskan bagaimana respon pada *based* pada *shaking table* dengan *linear model* dan *decoupling control*. Pada gambar 2.2 merupakan pemodelan fisik penempatan *hydraulic* pada *shaking*

table dan gambar 2.3 merupakan pemodelan matematis pada sebuah *hydraulic* yang bekerja



Gambar 2. 2 Pemodelan fisik penempatan hydraulic [6]



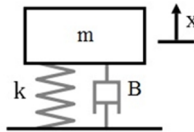
Gambar 2. 3 Pemodelan matematis pada sebuah hydraulic yang bekerja [6]

2.2 Getaran

Getaran didefinisikan sebagai gerakan bolak balik dari suatu benda dari titik awalnya melalui titik setimbangnya^[1]. Ilustrasi yang paling sederhana adalah sebuah pendulum yang berayun. Secara umum, sistem getaran termasuk sarana untuk menyimpan energi potensial (pegas), sarana untuk menyimpan energi kinetik (massa atau inersia), dan sarana untuk menghilangkan energi secara bertahap (peredam)^[1]. Jika sistem teredam, beberapa energi akan terdisipasi ke dalam siklus getaran dan harus digantikan dengan sumber eksternal jika keadaan getaran stabil yang diinginkan. Sistem getaran yang sederhana meliputi massa, pegas, dan peredam. Getaran dapat diklasifikasikan menjadi:

- **Free vibration**, terjadi ketika sistem mekanik berangkat dengan input awal dan kemudian dibiarkan bergetar secara bebas^[8].

Free vibration with damping :



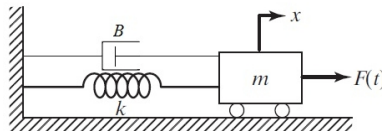
Gambar 2. 4 Contoh sederhana dari sistem *free vibration with damping*

Berikut turunan persamaan dari gambar 2.4 :

$$m\ddot{x} + B\dot{x} + kx = 0 \quad (2.1)$$

- **Forced vibration**, terjadi jika sistem mekanik terkena gaya luar^[1].

Forced vibration with damping :



Gambar 2. 5 Contoh sederhana dari sistem *forced vibration with damping*

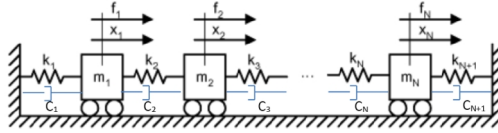
Berikut turunan persamaan dari gambar 2.5 :

$$m\ddot{x} + B\dot{x} + kx = F(t) \quad (2.2)$$

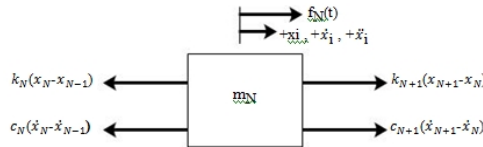
2.3 Sistem diskrit multi-DOF

Sistem getaran dengan multi derajat kebebasan (MDOF) adalah sistem yang digunakan untuk menentukan kedudukan massa dalam ruang yang membutuhkan banyak (n) arah koordinat

bebas. Sistem getaran tersebut dapat digambarkan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6 berikut ini.



Gambar 2. 6 Sistem getaran multi derajat kebebasan



Gambar 2. 7 *Free body diagram* multi derajat kebebasan

Untuk analisa multi derajat kebebasan dapat dilihat pada gambar 2.7. Persamaan gerak dari sistem diatas untuk massa m_N dapat disederhanakan menjadi:

$$m_N \ddot{x}_N - c_N \dot{x}_{N-1} + (c_N + c_{N+1}) \dot{x}_N - c_{N+1} \dot{x}_{N+1} - k_N x_{N-1} + (k_N + k_{N+1}) x_N - k_{N+1} x_{N+1} = F_N(t) \quad (2.3)$$

Persamaan (2.4) dapat digambarkan dengan metode matriks sehingga didapatkan

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = \{F\} \quad (2.4)$$

dengan M mewakili matriks massa, K matriks kekakuan dan C matriks redaman yang mempunyai jumlah baris dan kolom yang sama yaitu n.

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & m_N \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$[c] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -c_N & (c_N + c_{N+1}) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$[k] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -k_N & (k_N + k_{N+1}) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2.4 Redaman

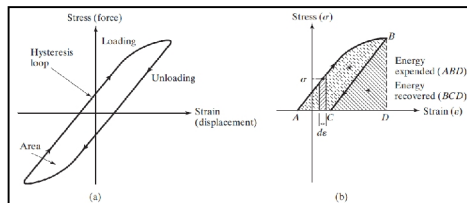
Pada umumnya, energi getaran diubah menjadi panas atau suara. Karena pengurangan energi, respon (seperti perpindahan pada sistem) akan menurun. Mekanisme dari energi getaran diubah menjadi panas atau suara diketahui sebagai redaman (damping). Walaupun jumlah energi yang diubah menjadi panas atau suara relatif kecil, pertimbangan redaman menjadi penting untuk prediksi yang akurat dari respon getaran sistem^[7]. Berikut beberapa jenis redaman:

Viscous Damping^[7] merupakan mekanisme redaman yang paling sering digunakan dalam analisa getaran. Saat sistem mekanis bergetar dalam media fluida (seperti udara, gas, air, atau oli), perlawanan dari fluida terhadap sistem inilah yang menyebabkan energi terdisipasi. Jumlah energi yang terdisipasi bergantung beberapa faktor, yaitu bentuk dan ukuran massa yang bergetar, viskositas fluida, frekuensi getaran, dan kecepatan massa

tersebut bergetar. Dalam viscous damping, gaya redam sebanding dengan kecepatan massa bergetar.

Coulomb or Dry-Friction Damping^[7]. Gaya redam besarnya konstan tetapi berlawanan arah dengan gerak massa yang bergetar. Hal ini disebabkan oleh gesekan antara menggosok permukaan yang baik kering atau pelumasan cukup.

Material or Solid or Hysteretic Damping^[7]. Ketika material berdeformasi, energi akan diserap dan terdisipasi oleh material. Hal ini disebabkan karena gesekan antara bagian dalam yang slip atau bergeser karena deformasi. Saat sebuah massa yang mempunyai material damping bergetar, diagram stress-strain ada pada gambar 2.8 Daerah yang ditunjukkan pada gambar, menunjukkan energi yang hilang tiap unit volume massa per *cycle* karena redaman yang terjadi.



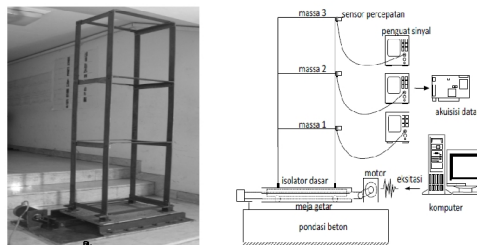
Gambar 2. 8 *Diagram Stress-Strain*^[7]

2.4.1 Sistem Isolasi Seismik Pada Struktur Bangunan dengan Menggunakan Bantalan Karet

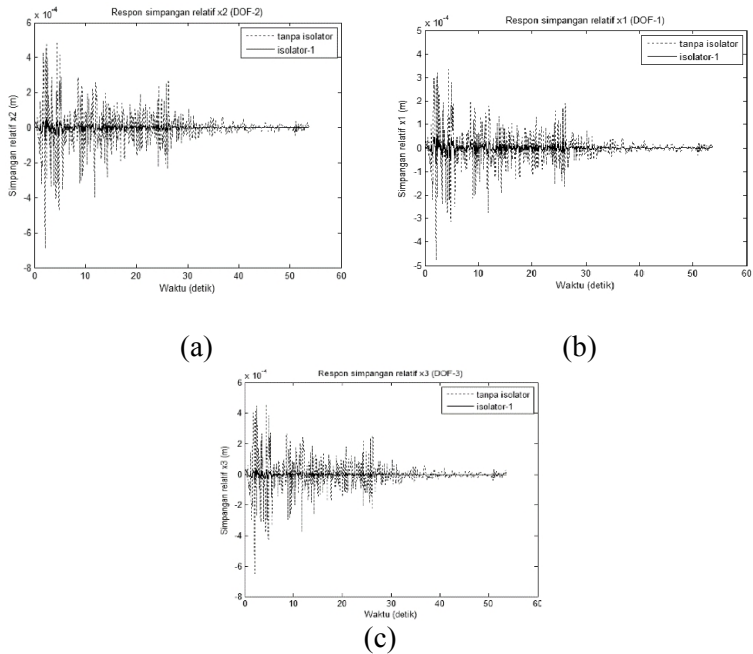
Penelitian mengenai redaman pernah dilakukan oleh Herlien dkk, 2008 yang berjudul “Pengembangan Sistem Isolasi Seismik pada Struktur Bangunan yang Dikenai Beban Gempa sebagai Solusi untuk Membatasi Respon Dinamik”^[3]. Alat uji gempa yang digunakan menggunakan mekanisme engkol seperti yang terlihat pada gambar 2.9. Melalui model matematis, pemodelan, dan model eksperimental, penelitian ini menjelaskan dan membahas bagaimana pengaruh perubahan respon dinamis gedung terhadap penambahan isolator dasar menggunakan bantalan karet atau tanpa

menggunakan isolator dasar dengan menggunakan percepatan gempa *El Centro N-S*.

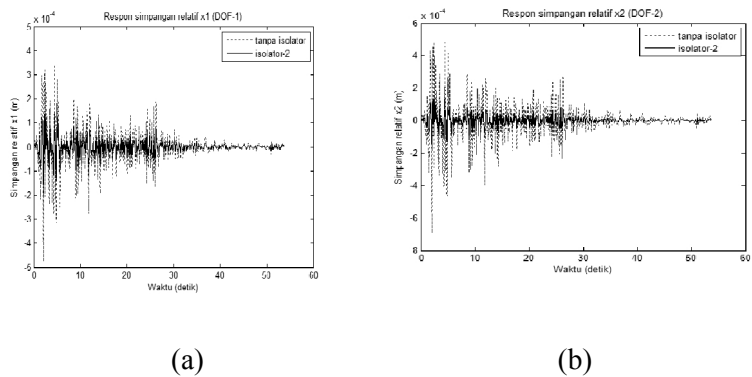
Hasil dari pengujian didapat bahwa bantalan karet sebagai isolator dasar memiliki kemampuan meredam respon dinamis yang sangat baik terhadap getaran gedung daripada tanpa menggunakan isolator dasar pada gedung. Efektivitas penggunaan isolator dasar sangat tergantung pada kekakuan geser isolator. Makin kecil kekakuan gesernya, makin besar reduksi respon struktur yang diperoleh^[3]. Pada gambar 2.10 Merupakan perbandingan grafik simpangan vs waktu tanpa isolator dengan menggunakan isolator 1 dan didapat bahwa dengan menggunakan isolator 1 dapat mereduksi perpindahan gedung berkisar 84.6% - 92.57%. Pada gambar 2.11 merupakan perbandingan grafik simpangan vs waktu tanpa isolator dengan menggunakan isolator 2 didapat bahwa dengan menggunakan isolator 2 dapat mereduksi perpindahan gedung berkisar 58.13% - 79.78%. Pada gambar 2.12 merupakan perbandingan grafik simpangan vs waktu tanpa isolator dengan menggunakan isolator 3 didapat bahwa dengan menggunakan isolator 3 dapat mereduksi perpindahan gedung berkisar 52.84% - 77.21%. Isolator 1,2, dan 3 merupakan istilah untuk tingkat kekerasan pada karet. Isolator 1 tingkat kekerasan lembut, isolator 2 tingkat kekerasan sedang, dan isolator 3 tingkat kekerasan keras.

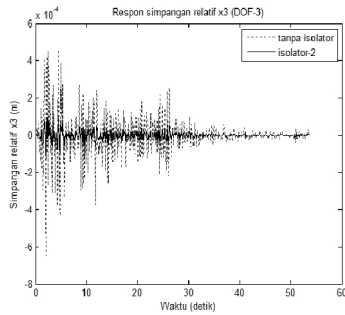


Gambar 2. 9 Alat Uji Gempa dengan mekanisme engkol^[3]



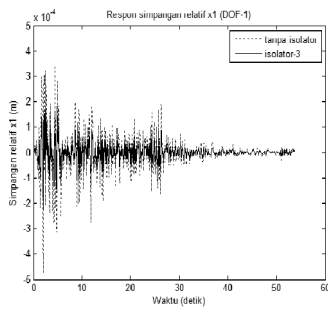
Gambar 2. 10 Respon simpangan struktur dengan isolator-1 akibat percepatan dasar gempa El Centro N-S: (a) DOF-1, (b) DOF-2, (c) DOF-3^[3]



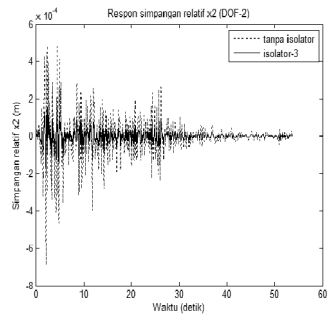


(c)

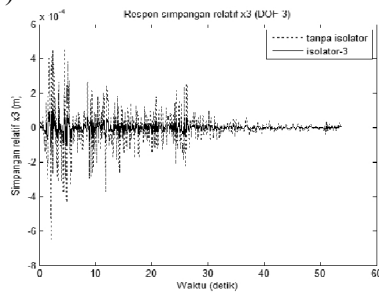
Gambar 2. 11 Respon simpangan struktur dengan isolator-2 akibat percepatan dasar gempa El Centro N-S: (a) DOF-1, (b) DOF-2, (c) DOF-3^[3]



(a)



(b)



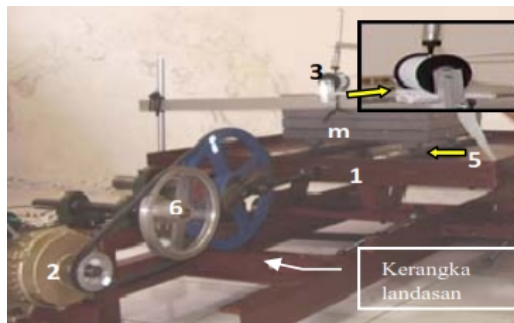
(c)

Gambar 2. 12 Respon simpangan struktur dengan isolator-3 akibat percepatan dasar gempa El Centro N-S: (a) DOF-1, (b) DOF-2, (c) DOF-3^[3]

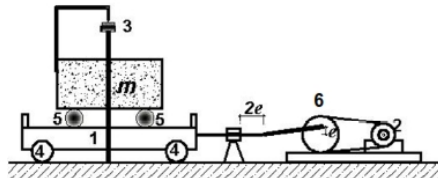
2.4.2 Sistem Isolasi Seismik dengan Menggunakan Bola Baja

Pada penelitian Benyamin dkk, 2010 yang berjudul “Karakteristik Dinamika Bola Baja Sebagai Material Isolasi Seismik”^[4] simulator gempa yang digunakan menggunakan mekanisme engkol seperti yang terlihat pada gambar 2.13. Melalui model matematis, pemodelan, dan model eksperimental, penelitian ini menjelaskan dan membahas bagaimana pengaruh perubahan parameter massa, frekuensi getar meja, dan amplitude terhadap respon bentuk rumah bola berbentuk silinder belah dan setengah bola .

Hasil dari pengujian didapat bahwa rumah bola berbentuk silinder belah jauh lebih efektif meredam pengaruh getaran dibandingkan dengan rumah bola berbentuk setengah bola. Semakin tinggi percepatan meja getar, semakin besar presentase redaman percepatan yang diteruskan ke massa^[4]. Tabel 2.1, tabel 2.2, tabel 2.3, dan tabel 2.4 merupakan respon untuk rumah bola dengan frekuensi meja getar.



Gambar 2. 13 Foto fisik alat uji gempa bumi dengan mekanisme engkol^[4]



Gambar 2. 14 Pemodelan fisik alat uji gempa bumi dengan mekanisme engkol^[4]

Tabel 2. 1 Respon untuk rumah bola berbentuk silinder belah pada frekuensi meja getar ± 151 cpm (± 15.8 rad/s)^[4]

Masa (kg)	Meja getar		Respons massa		Percepatan		Ratio	Reduksi Percepatan
	A_m (mm)	ω (rad/s)	A_s (mm)	ω (rad/s)	a_m gals	a_s gals	a_s/a_m %	
12.5	5	15.79	0.4	15.83	125	10.0	8.0%	92.0%
	10	15.84	0.4	15.86	251	10.0	4.0%	96.0%
	20	15.84	0.5	15.89	502	12.6	2.5%	97.5%
25	5	15.89	0.4	15.94	126	10.2	8.1%	91.9%
	10	15.84	0.4	15.84	251	10.0	4.0%	96.0%
	20	15.81	0.5	15.94	500	12.7	2.5%	97.5%
50	5	15.87	0.4	15.70	126	9.9	7.8%	92.2%
	10	15.84	0.4	15.90	251	10.1	4.0%	96.0%
	20	15.77	0.5	15.88	497	12.6	2.5%	97.5%
75	5	15.95	0.4	15.95	127	10.2	8.0%	92.0%
	10	15.89	0.4	15.89	252	10.1	4.0%	96.0%
	20	15.77	0.4	15.83	497	10.0	2.0%	98.0%

Tabel 2. 2 Respon untuk rumah bola berbentuk silinder belah pada frekuensi meja getar ± 240 cpm (± 25.2 rad/s)^[4]

Masa (kg)	Meja getar		Respons massa		Percepatan		Ratio	Reduksi Percepatan
	A_m (mm)	ω (rad/s)	A_s (mm)	ω (rad/s)	a_m gals	a_s gals	a_s/a_m %	
12.5	5	25.19	0.2	25.18	317	12.7	4.0%	96.0%
	10	25.15	0.2	25.24	633	12.7	2.0%	98.0%
	20	25.19	0.2	25.24	1269	12.7	1.0%	99.0%
25	5	25.17	0.2	25.14	317	12.6	4.0%	96.0%
	10	25.19	0.2	25.14	634	12.6	2.0%	98.0%
	20	25.19	0.2	25.23	1269	12.7	1.0%	99.0%
50	5	25.17	0.2	25.19	317	12.7	4.0%	96.0%
	10	25.16	0.2	25.16	633	12.7	2.0%	98.0%
	20	25.15	0.2	25.36	1265	12.9	1.0%	99.0%
75	5	25.21	0.2	25.24	318	12.7	4.0%	96.0%
	10	25.16	0.3	25.07	633	15.7	2.5%	97.5%
	20	25.20	0.3	25.26	1270	19.1	1.5%	98.5%

Tabel 2. 3 Respon untuk rumah bola berbentuk setengah bola pada frekuensi meja getar ± 151 cpm (± 15.8 rad/s)^[4]

Massa (kg)	Meja getar		Respons massa		Percepatan		Ratio	Reduksi
	A_m (mm)	w (rad/s)	A_s (mm)	w (rad/s)	a_m gals	a_s gals	a_m/a_s %	Percepatan %
12.5	5	15.85	3.5	15.94	126	88.9	70.7%	29.3%
	10	15.79	4.0	15.77	249	99.4	39.9%	60.1%
	20	15.83	3.0	15.80	501	74.9	14.9%	85.1%
25	5	15.84	3.0	15.84	126	75.3	60.0%	40.0%
	10	15.79	4.0	15.87	249	100.7	40.4%	59.6%
	20	15.81	3.5	15.89	500	88.4	17.7%	82.3%
50	5	15.85	3.0	15.88	126	75.6	60.2%	39.8%
	10	15.87	3.5	15.80	252	87.4	34.7%	65.3%
	20	15.83	4.0	15.87	501	100.8	20.1%	79.9%
75	5	15.85	3.5	15.87	126	88.1	70.1%	29.9%
	10	15.85	3.5	15.82	251	87.6	34.9%	65.1%
	20	15.81	3.5	15.83	500	87.7	17.5%	82.5%

Tabel 2. 4 Respon untuk rumah bola berbentuk setengah bola pada frekuensi meja getar ± 240 cpm (± 25.2 rad/s)^[4]

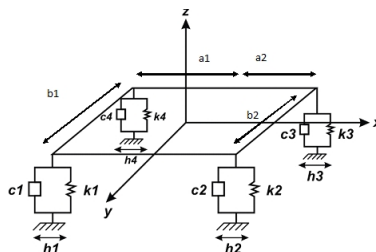
Massa (kg)	Meja getar		Respons massa		Percepatan		Ratio	Reduksi
	A_m (mm)	w (rad/s)	A_s (mm)	w (rad/s)	a_m gals	a_s gals	a_s/a_m %	Percepatan %
12.5	5	25.14	1.5	25.16	316	95.0	30.0%	70.0%
	10	25.16	1.5	25.13	633	94.7	15.0%	85.0%
	20	25.16	1.5	25.19	1266	95.2	7.5%	92.5%
25	5	25.20	1.5	25.16	317	94.9	29.9%	70.1%
	10	25.13	1.5	25.13	632	94.7	15.0%	85.0%
	20	25.15	1.5	25.20	1265	95.2	7.5%	92.5%
50	5	25.15	1.5	25.22	316	95.4	30.2%	69.8%
	10	25.19	1.5	25.17	634	95.1	15.0%	85.0%
	20	25.13	1.5	25.17	1263	95.0	7.5%	92.5%
75	5	25.19	1.5	25.20	317	95.2	30.0%	70.0%
	10	25.17	1.5	25.13	634	94.7	15.0%	85.0%
	20	25.14	1.5	25.17	1264	95.0	7.5%	92.5%

2.4.3 Peredam Getaran Bangunan dengan Model Empat Tumpuan

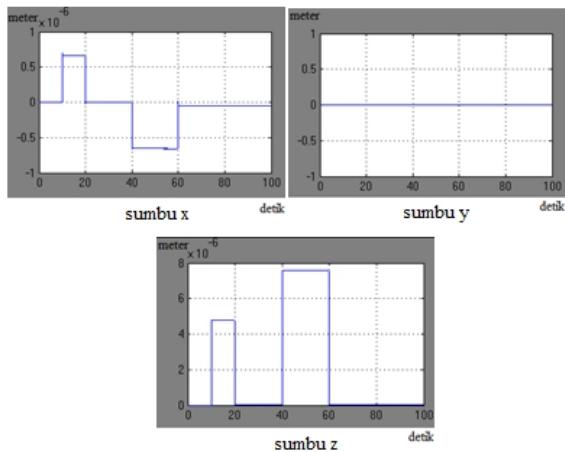
Penelitian dengan menggunakan 3mpat tumpuan dilakukan oleh Fitriana dan Ir. Yerri Susatio, MT, 2013 yang berjudul

“Simulasi Peredaman Getaran Bangunan dengan Model Empat”^[5]. Melalui model matematis dan pemodelan pada gambar 2.15, penelitian ini menjelaskan dan membahas bagaimana pengaruh perubahan parameter nilai konstanta pegas (k), damper (c) dan massa bangunan (m) yang diperbesar dan diperkecil maka akan diketahui pengaruhnya terhadap respon getaran bangunan tersebut^[5].

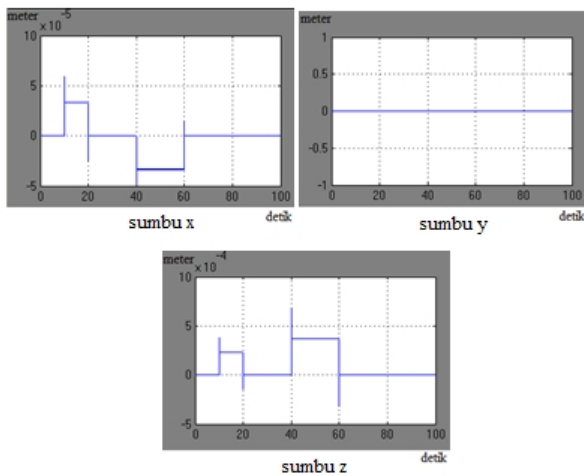
Hasil yang didapatkan dari simulasi Simulink yang pertama adalah perubahan nilai konstanta pegas (k) sebesar 1.02×10^4 N/m didapat nilai amplitudo pada sumbu x sebesar 6.63×10^{-7} m, pada sumbu y sebesar 0 m, dan pada sumbu z sebesar 7.6×10^{-6} m sesuai pada gambar 2.16. Untuk nilai konstanta sebesar 1.02×10^{15} N/m didapat nilai amplitudo pada sumbu x sebesar 3.3×10^{-5} m, pada sumbu y sebesar 0 m, dan pada sumbu z sebesar 0.0006 m sesuai pada gambar 2.17. selanjutnya adalah perubahan nilai damper (c) sebesar 2.04×10^5 N.s/m didapat nilai amplitudo pada sumbu x sebesar 3.31×10^{-5} m, pada sumbu y sebesar 0 m, dan pada sumbu z sebesar 3.76×10^{-4} m sesuai pada gambar 2.18. untuk nilai damper (c) sebesar 2.04×10^{10} N.s/m didapat nilai amplitudo pada sumbu x sebesar 3.31×10^{-5} m, pada sumbu y sebesar 0 m, dan pada sumbu z sebesar 3.76×10^{-4} m sesuai pada gambar 2.19. Selanjutnya adalah perubahan parameter nilai massa bangunan (m) sebesar 656717 kg dan 985075 kg didapat bahwa perubahan massa mempengaruhi amplitudo sesuai gambar 2.20.



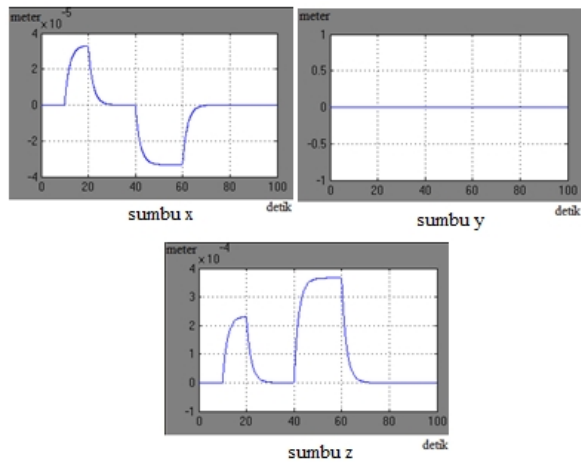
Gambar 2. 15 Model fisis bangunan dengan model empat tumpuan ^[5]



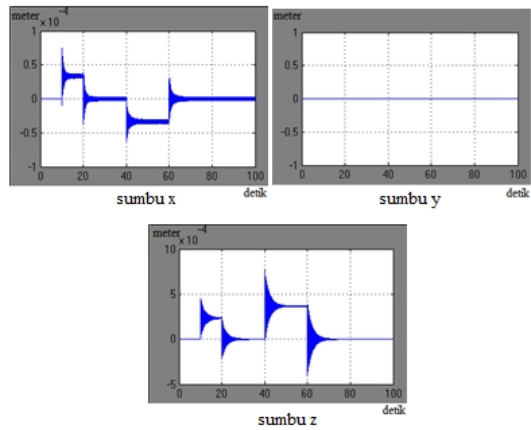
Gambar 2. 16 Respon getaran bangunan dengan nilai konstanta pegas
(k) $1.02 \times 10^4 \text{ N/m}^{[5]}$



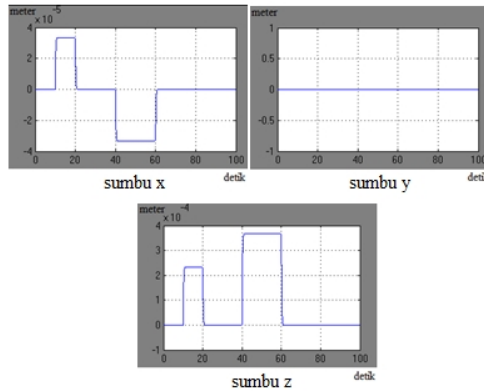
Gambar 2. 17 Respon getaran bangunan dengan nilai konstanta pegas
(k) $1.02 \times 10^{15} \text{ N/m}^{[5]}$



Gambar 2. 18 Respon getaran bangunan dengan nilai damper (c) $2.04 \times 10^{10} \text{ N.s/m}^{[5]}$



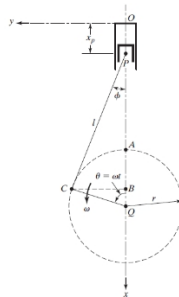
Gambar 2. 19 Respon getaran bangunan dengan nilai damper (c) $2.04 \times 10^5 \text{ N.s/m}^{[5]}$



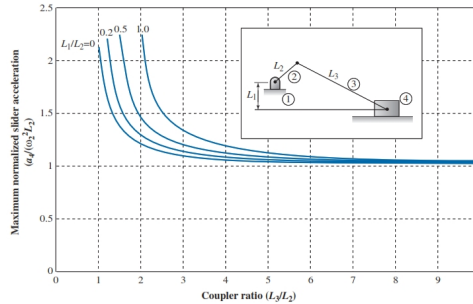
Gambar 2. 20 Respon getaran bangunan dengan nilai massa bangunan 820896 kg dan 985075 kg^[5]

Mekanisme Gerak Engkol

Mekanisme silinder torak merupakan mekanisme gerak bolak-balik piston, engkol, dan batang penghubung. Mekanisme ini digunakan untuk mendapatkan gaya yang bekerja pada *shaking table* dan hubungan antara panjang batang penghubung, putaran motor dan kecepatan pada *shaking table*.



Gambar 2. 21 Mekanisme Engkol^[1]



Gambar 2. 22 Maksimum percepatan slider untuk mekanisme engkol

Gambar di atas menunjukkan engkol dengan panjang r , batang penghubung dengan panjang l , dan silinder torak yang bergerak bolak-balik. Engkol disumsikan berotasi melawan arah gerak jarum jam dengan putaran sudut ω . Perpindahan piston dapat diekspresikan pada persamaan :

$$\begin{aligned} x_p &= r + l - r \cos \theta - l \cos \phi \\ &= r + l - r \cos \omega - l \sqrt{1 - s_1^2} \phi \end{aligned} \quad (2.8)$$

bila,

$$l \sin \phi = r \sin \theta = r \sin \omega \quad (2.9)$$

maka,

$$\cos \phi = \left(1 - \frac{r^2}{l^2} s_1^2 \omega^2\right)^{1/2} \quad (2.10)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.10 ke 2.8 maka di dapatkan,

$$x_p = r + l - r \cos \omega - l \sqrt{1 - \frac{r^2}{l^2} s_1^2 \omega^2} \quad (2.11)$$

Persamaan di atas dapat disederhanakan dengan catatan $\frac{r}{l} < \frac{1}{4}$ yang didapatkan pada persamaan

$$\sqrt{1 + \varepsilon} \approx 1 - \frac{\varepsilon}{2} \quad (2.12)$$

Sehingga

$$\begin{aligned} x_p &\approx r(1 - c_1) + \frac{r^2}{2l} \sin^2 \omega \\ x_p &= r \left(1 + \frac{r}{2l} \right) - r(c_1 + \frac{r}{4l} \cos 2\omega) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Persamaan perpindahan di atas dapat diturunkan ke dalam bentuk kecepatan dan percepatan dari piston sehingga didapatkan :

$$\dot{x}_p = r \omega (\sin \omega + \frac{r}{2l} \sin 2\omega) \quad (2.14)$$

$$\ddot{x}_p = -r\omega^2 (\cos \omega + \frac{r}{l} \sin 2\omega) \quad (2.15)$$

2.5 Perhitungan Daya pada Motor

Untuk mendapatkan nilai daya dari motor maka didapatkan dengan perhitungan sebagai berikut :

$$P = \frac{d}{dt} \quad (2.16)$$

Bila usaha $dW = F \cdot dr$ maka,

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{F \cdot d}{dt} = F \cdot \frac{d}{dt}$$

Sehingga

$$P = F \cdot v \quad (2.17)$$

atau,

$$P = T \cdot \omega \quad (2.18)$$

Di mana,

v = kecepatan (m/s)

F = gaya (N)

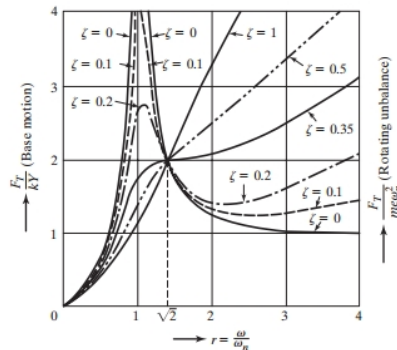
T = torsi (N.m)

ω = kecepatan sudut (rad/s)

2.6 Force Transmissibility

➤ Motion of Base^[1]

Rasio dari F_T/kY diketahui sebagai force transmissibility dengan catatan gaya yang ditransmisikan berada pada fase yang sama dengan gerakan dari massa $x(t)$. Variasi dari gaya yang ditransmisikan ke permukaan meja getar dengan rasio frekuensi r dapat dilihat pada gambar 2.22. untuk nilai damping ratio (ζ) yang berbeda.



Gambar 2. 23 Force Transmissibility untuk Motion of Base^[1]

Gaya, F , ditransmisikan ke permukaan jalan atau tumpuan bergantung pada reaksi dari pegas (spring) dan dashpot. Gaya tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:

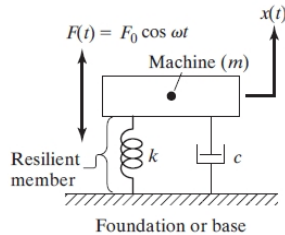
$$F = k(x - y) + c(\dot{x} - \dot{y}) = -m\ddot{x}$$

$$F = m\omega^2 X \quad (\omega - \phi) = F_T \sin (\omega - \phi) \quad (2.20)$$

Di mana F_T adalah amplitudo atau nilai maksimum dari gaya yang ditransmisikan ke permukaan lantai.

➤ **Base Isolation of Rigid Foundation^[1]**

Untuk *force transmissibility* dengan kasus *base isolation* di mana F_T adalah amplitudo atau nilai maksimum dari gaya yang ditransmisikan ke lantai *base*. Gaya tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:



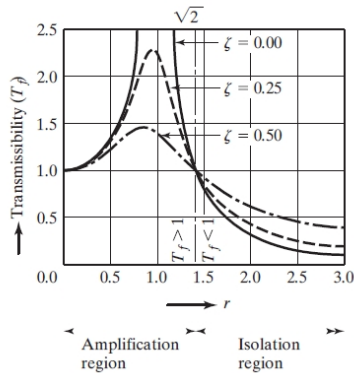
Gambar 2. 24 Machine and resilient member on rigid foundation

$$\begin{aligned}
 F &= [(k)^2 + (c\dot{x})^2]^{1/2} = X\sqrt{K^2 + \omega^2 c^2} \\
 &= \\
 &= \frac{F (k^2 + \omega^2 c^2)^{1/2}}{[(k - m\omega^2)^2 + \omega^2 c^2]^{1/2}} \\
 &(2.21)
 \end{aligned}$$

Sehingga *transmission ratio of the isolator* (T_f) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$T = \frac{F}{F} = \frac{(k^2 + \omega^2 c^2)^{1/2}}{[(k - m\omega^2)^2 + \omega^2 c^2]^{1/2}}$$

$$= \left\{ \frac{1 + (2\zeta)^2}{[1 - r^2]^2 + (2\zeta)^2} \right\}^{1/2} \quad (2.22)$$



Gambar 2. 25 *Force Transmissibility untuk Base Isolation*^[1]

Di mana $r = \omega/\omega_n$ adalah frekuensi rasio. Variasi T_f dengan frekuensi rasio ditunjukkan pada gambar 2.24. Berikut merupakan karakteristik yang didapat dari gambar grafik di atas :

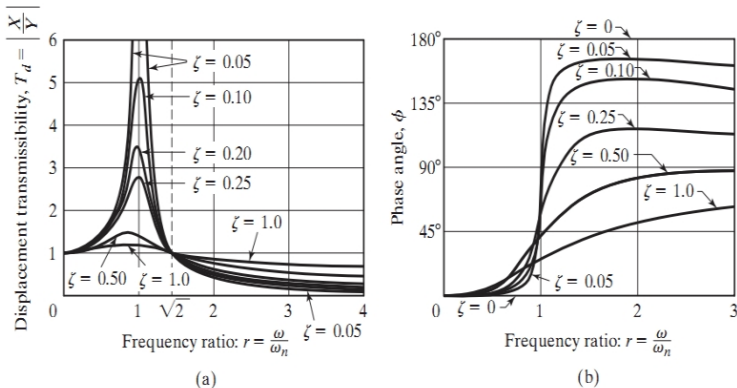
- Besar gaya yang ditransmisikan ke lantai (*base*) dapat dikurangi dengan mengurangi nilai frekuensi natural sistem
- Besar gaya yang ditransmisikan ke lantai (*base*) dapat dikurangi dengan meminimalkan nilai *damp ratio* (ζ). Meskipun ketika $r > \sqrt{2}$ komponen motor penggerak harus melewati fase resonansi.
- Meskipun redaman mengurangi amplitudo dari massa (X) untuk semua frekuensi, hal itu mengurangi gaya yang ditransmisikan ke lantai (*base*) hanya jika $r < \sqrt{2}$ sehingga penambahan peredam menambah besar gaya yang ditransmisikan.
- Jika kecepatan pada mesin divariasikan, kita harus memilih nilai peredam untuk meminimalisir gaya yang ditransmisikan. Besar peredam harus diperhitungkan

berdasarkan batas amplitudo dan gaya yang ditransmisikan ketika melewati fase resonansi tetapi tidak terlalu banyak meningkatkan gaya yang ditransmisikan ketika beroperasi pada kecepatan operasinya.

2.7 Displacement Transmissibility

➤ Motion of Base^[1]

Rasio dari amplitudo respon $X_{p(t)}$ terhadap *base motion* $y(t)$, yaitu $\frac{X}{Y}$, disebut dengan *displacement transmissibility*. *Displacement transmissibility* adalah seberapa besar respon gerakan yang ditransmisikan dari input meja getar ke massa struktur atau beban dengan variasi frekuensi saat berkendara. Grafik transmisibilitas perpindahan dapat dilihat pada gambar 2.25. di bawah ini.



Gambar 2. 26 Displacement transmissibility dan Phase Angle^[1]

Berikut ini merupakan karakteristik yang didapat dari gambar 2.25.a, yaitu:

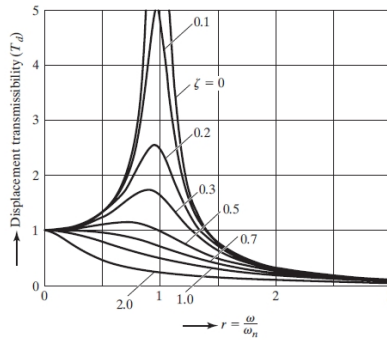
1. $T_d = 1$ saat $r = 0$ dan mendekati 1 untuk nilai r yang sangat kecil
2. Untuk sistem yang tak teredam ($\zeta = 0$), T_d menuju tak hingga saat $r = 1$ (resonansi)

3. Nilai $T_d < 1$ ketika $r = \sqrt{2}$, untuk semua nilai ζ
4. Nilai $T_d = 1$ ketika $r = \sqrt{2}$, untuk semua nilai ζ
5. Untuk $r < \sqrt{2}$, semakin kecil nilai ζ maka akan semakin besar T_d -nya. Sebaliknya, untuk $r > \sqrt{2}$, semakin kecil nilai ζ maka akan semakin kecil T_d -nya
6. Nilai dari T_d mencapai maksimum untuk $0 < \zeta < 1$ pada saat $r = r_m < 1$. Perumusan r_m dapat ditulis sebagai berikut:

$$r_m = \frac{1}{2\zeta} [\sqrt{1 + 8\zeta^2} - 1]^{\frac{1}{2}} \quad (2.23)$$

➤ **Base Isolation of Rigid Foundation^[1]**

Untuk menganalisa *displacement transmissibility* dengan kasus ini maka menggunakan grafik yang tertera pada gambar 2.26



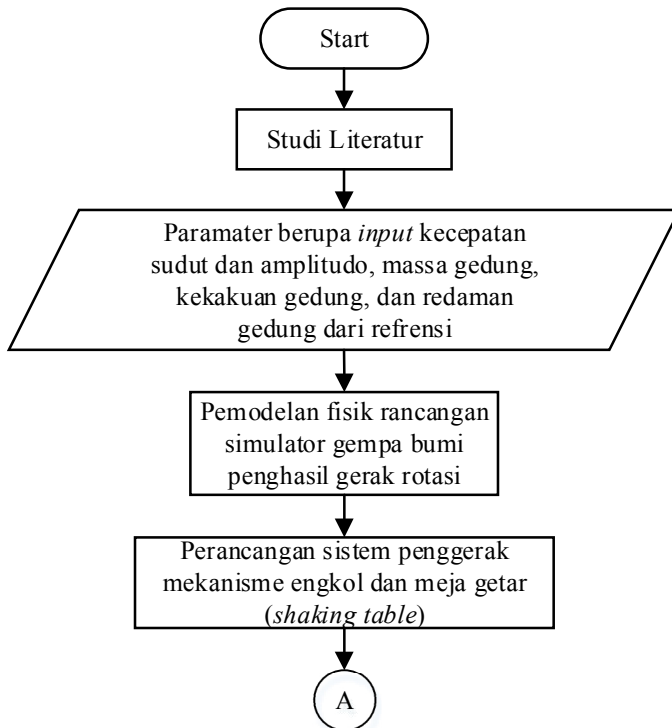
Gambar 2. 27 *Displacement transmissibility for Base Isolation of Rigid Foundation^[1]*

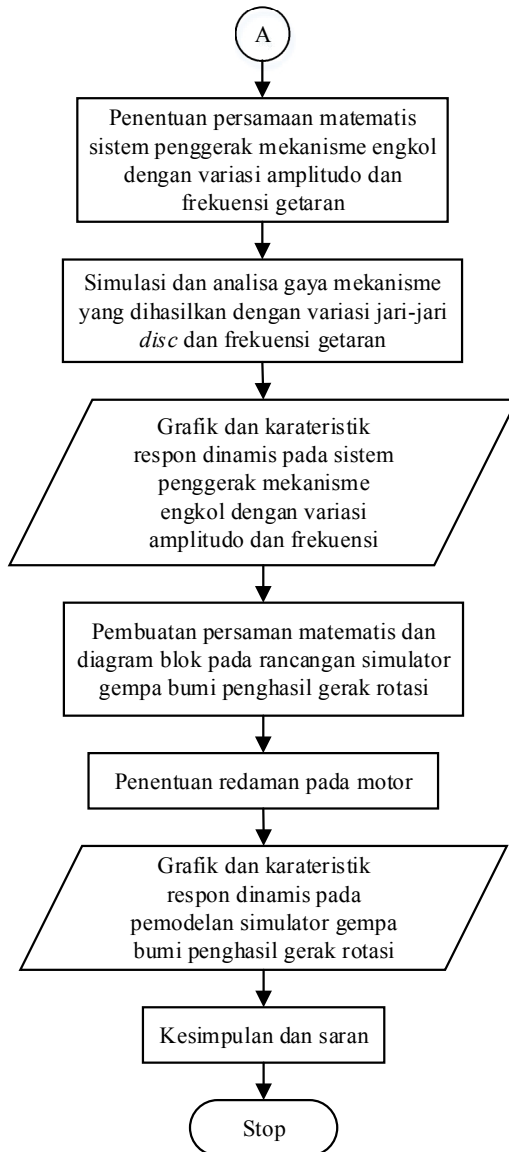
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI

3.1 Metode Penelitian

Penulisan tugas akhir ini dilakukan untuk mengetahui nilai redaman yang baik pada motor dan respon dinamis berupa perpindahan, kecepatan, dan percepatan dari perubahan parameter *input* motor pada simulator gempa bumi penghasil gerak rotasi. Dalam proses analiis dilakukan beberapa langkah yang ditunjukkan oleh diagram alir pada gambar 3.1





Gambar 3. 1 Diagram alir penyelesaian tugas akhir

Metode pelaksanaan tugas akhir ini secara umum ditunjukkan pada gambar 3.1, dimulai dari studi literatur mengenai sistem pemodelan alat uji gempa dari jurnal-jurnal terdahulu . Langkah selanjutnya yaitu pemodelan dinamis rancangan simulator gempa bumi penghasil gerak rotasi. Kemudian membuat perancangan sistem mekanisme engkol dan meja getar (*shaking table*) dengan variasi amplitudo. Selanjutnya adalah penentuan respon dinamis pada sistem penggerak mekanisme engkol dengan variasi amplitudo dan frekuensi. Selanjutnya adalah mensimulasikan persamaan tersebut menggunakan MATLAB. Hasil dari simulasi adalah gaya yang dihasilkan pada sistem penggerak mekanisme engkol dengan variasi amplitudo dan frekuensi getar. Untuk selanjutnya, yaitu dengan membuat diagram blok di Simulink pada rancangan alat uji gempa bumi dengan *input* rotasi menggunakan sistem penggerak mekanisme engkol. hasil simulasi tersebut didapatkan grafik karakteristik dinamis dari sistem pemodelan simulator gempa bumi penghasil gerak rotasi. Seteleah itu dilakukan analisis dari grafik tersebut dan membuat perbandingan dari grafik tersebut setelah itu adalah penentuan redaman motor yang digunakan untuk mengurangi gaya yang ditransmisikan ke lantai (*base*) sekecil mungkin sehingga membuat motor memiliki ketahanan yang lebih baik.. Terakhir membuat kesimpulan berdasarkan hasil yang didapatkan untuk selanjutnya bisa digunakan sebagai referensi untuk pembuatan model fisiknya untuk kedepannya.

3.2 Tahap Studi Literatur

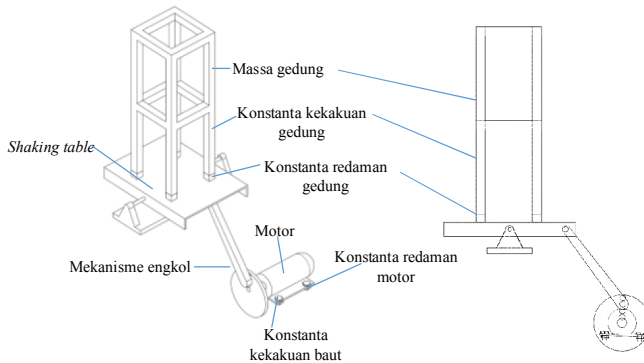
Dalam penulisan tugas akhir ini diperlukan referensi-referensi yang dapat menunjang dalam menganalisis sistem alat uji gempa bumi. Oleh karena itu, dilakukan studi literatur untuk menambah wawasan, pengetahuan, dan landasan mengenai permasalahan yang akan dibahas. Adapun materi dari studi literatur yang mendukung dalam penulisan tugas akhir ini yaitu mekanika getaran dasar, pemodelan sistem dinamis, sistem mekanis getaran rotasi, serta pembuatan blok diagram pada program MATLAB

Simulink. Nilai parameter diambil dari jurnal-jurnal berupa data teknis dari sistem pemodelan alat uji gempa bumi yaitu massa beban bangunan, konstanta kekakuan bangunan, konstanta redaman karet, amplitudo, dan frekuensi yang akan diberikan pada meja getar (*shaking table*).

Refrensi untuk studi literature didapat dari buku, jurnal-jurnal ilmiah, maupun penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan. Sedangkan studi lapangan meliputi penentuan dimensi pada meja getar (*shaking table*).

3.3 Pemodelan Fisik Rancangan Simulator Gempa Bumi Penghasil Gerak Rotasi

Pemodelan ini memiliki ide bagaimana simulator gempa bumi ini memberikan *input* pada beban (gedung) berupa rotasi. Meja getar sebagai pemberi gaya pada beban menghasilkan *input* rotasi dengan amplitudo, kecepatan, dan percepatan tertentu. Dengan banyaknya alat *shaking table* di pasaran dimana *input* yang diberikan hanya translasi maka dibuatlah ide ini. Prinsip yang digunakan sama yaitu menggunakan penggerak mekanisme engkol, namun disini bagaimana penggerak mekanisme engkol ini bisa memberikan *input* pada *shaking table* menjadi rotasi. Cara kerja alat ini adalah dengan menggunakan motor listrik AC dimana pada poros dipasang *disc*. Lalu pada *disc* akan dipasang *connecting rod* sehingga membuat *connecting rod* dan *disc* menjadi mekanisme engkol yang berfungsi merubah gerak rotasi menjadi gerak translasi. Lalu mekanisme tersebut menjadi *input* pada *shaking table*. Dengan peletakan mekanisme pada ujung *shaking table*, maka membuat *shaking table* bergerak secara rotasi. Berikut rancangan pemodelan fisik simulator gempa bumi penghasil gerak rotasi pada gambar 3.2,



Gambar 3. 2 Pemodelan fisik rancangan simulator gempa bumi penghasil gerak rotasi

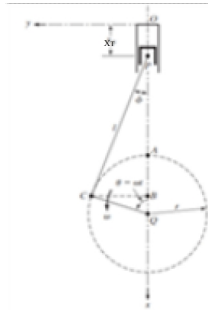
Motor sebagai *input* gaya menuju *shaking table* menggunakan mekanisme engkol dimana rotasi pada motor menjadi translasi. Penempatan ujung engkol berada sejauh L_1 dari titik pusat *shaking table* agar input yang diberikan menjadi gaya rotasi pada *shaking table* dimana titik pusat *shaking table* diberikan pin agar *shaking table* bergerak secara rotasi saja .

3.4 Perancangan, Pemodelan, dan Simulas Penggerak Mekanisme Engkol dengan Variasi Amplitudo Dan Frekuensi

3.4.1 Perancangan Dimensi Penggerak Mekanisme Engkol dengan Variasi Amplitudo

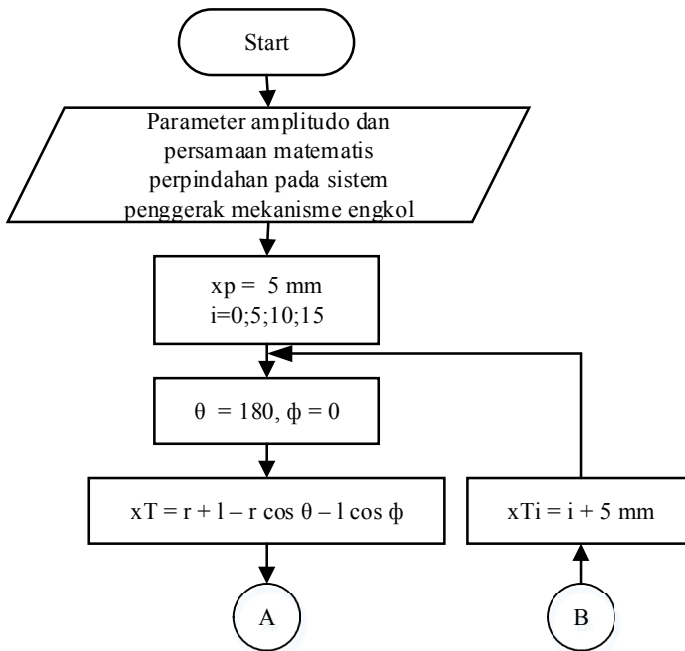
Perancangan dimensi penggerak mekanisme engkol sesuai dengan gambar 3.3, dimana yang harus ditentukan dahulu adalah panjang r . untuk menentukan panjang r bisa menggunakan hubungan amplitudo dimana amplitudo pada meja getar sama dengan panjang maksimal pada mekanisme engkol sesuai dengan persamaan .

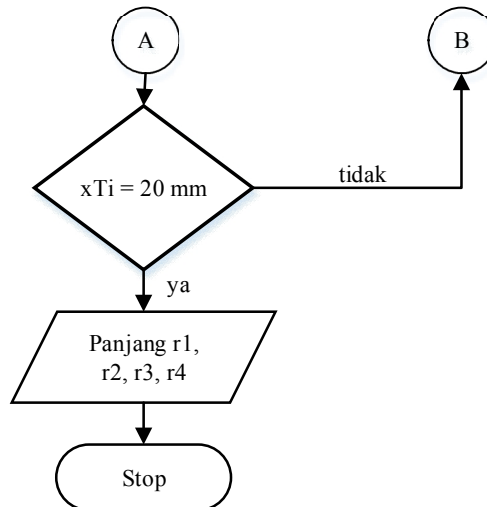
$$x_T = r + l - r \cos \theta - l \cos \phi \quad (2.8)$$



Gambar 3. 3 Model matematis dari mekanisme engkol

Variasi amplitudo yaitu 5 mm, 10 mm, 15 mm, dan 20 mm. berikut diagram alir untuk menentukan nilai r ,



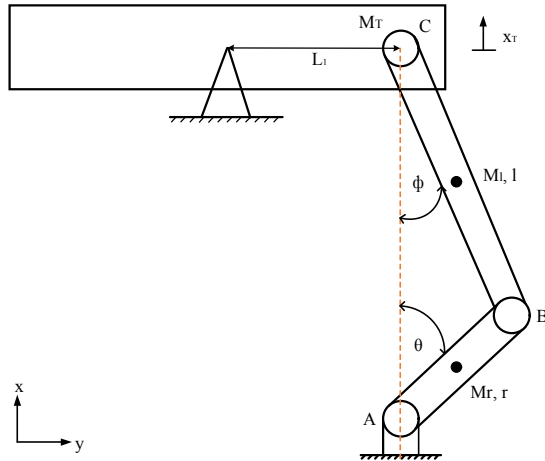


Gambar 3. 4 Diagram alir penentuan panjang r dengan variasi amplitudo 5 mm, 10 mm, 15 mm, dan 20 mm

Hasil dari diagram alir yaitu panjang r dengan variasi amplitudo 5 mm, 10 mm, 15 mm, dan 20 mm. sehingga panjang r yang didapat adalah r1 untuk amplitudo 5 mm, r2 untuk amplitudo 10 mm, r3 untuk amplitudo 15 mm, dan r4 untuk amplitudo 20 mm

3.4.2 Persamaan Matematis Sistem Penggerak Mekanisme Engkol dengan Variasi Amplitudo dan Frekuensi

Pemodelan matematis ini bertujuan untuk mengetahui gaya mekanisme yang bekerja pada mekanisme engkol yang akan digunakan untuk mendapatkan motor apa yang akan digunakan dan mendapatkan fungsi $F_{(t)} = F_o \sin \omega t$ sebagai *input* gaya pada *shaking table* dan motor.



Gambar 3. 5 Pemodelan matematis pada mekanisme engkol

Dimana,

M_r = Massa pada batang r

M_l = Massa pada batang l

M_T = Massa pada *shaking table*

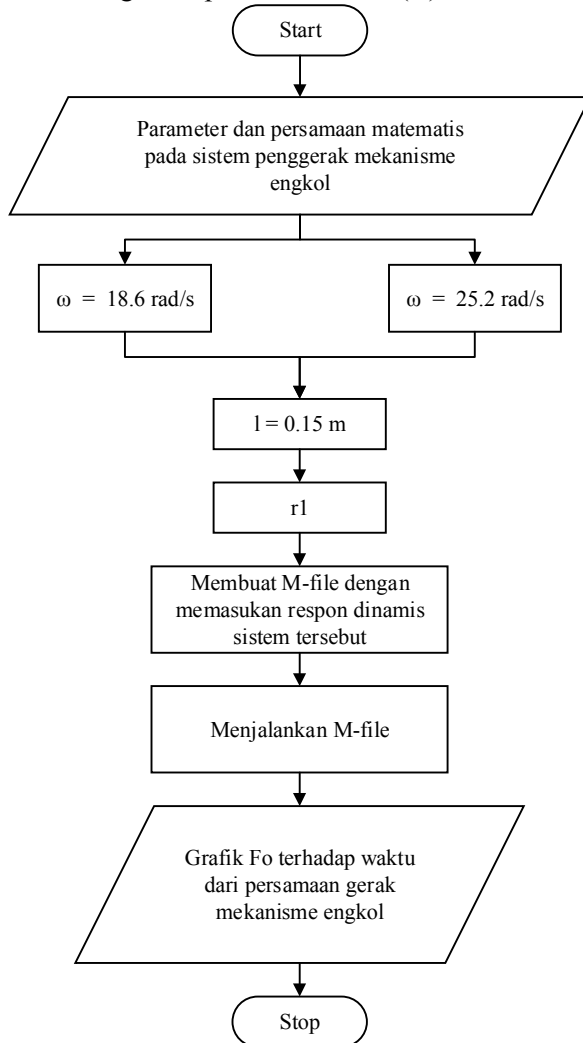
r = Panjang batang r

l = Panjang batang l

θ = Sudut batang r terhadap sumbu y

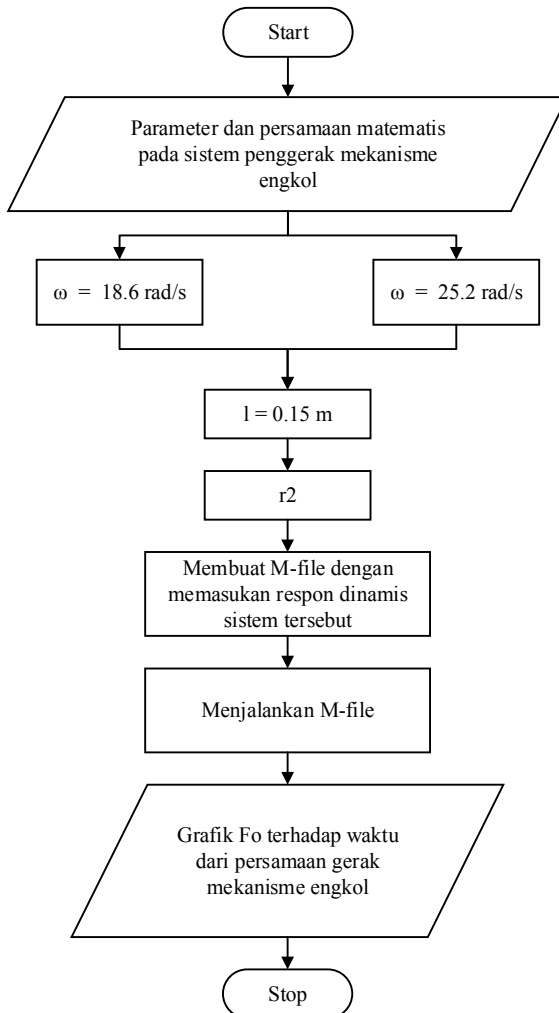
ϕ = Sudut batang l terhadap sumbu

- Variasi dengan amplitudo 0.005 m (r_1)



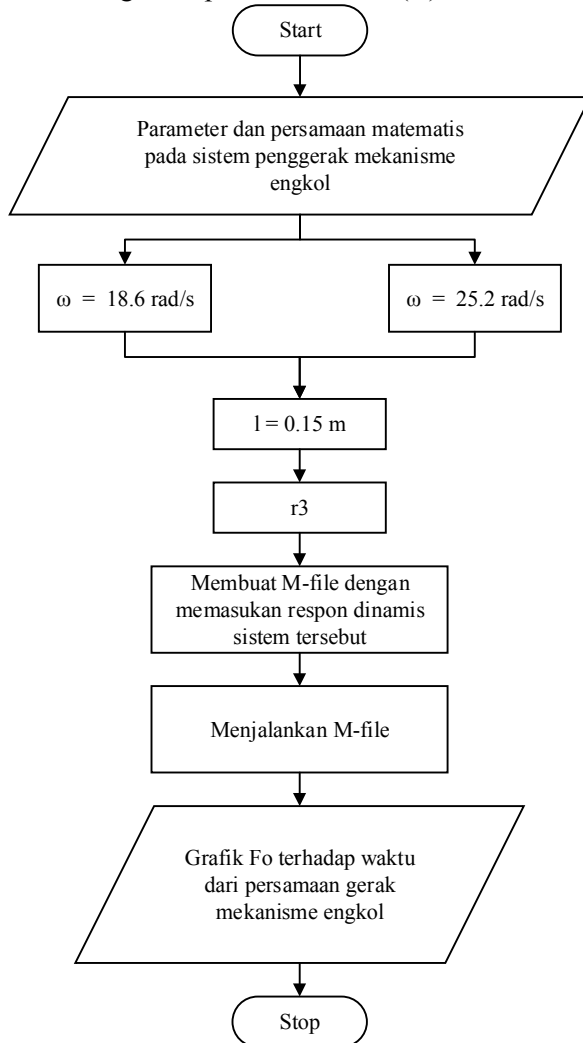
Gambar 3. 6 Diagram alir proses persamaan matematis dari sistem penggerak mekanisme engkol dengan variasi amplitudo 0.005 m dan frekuensi.

- Variasi dengan amplitudo 0.01 m (r_2)



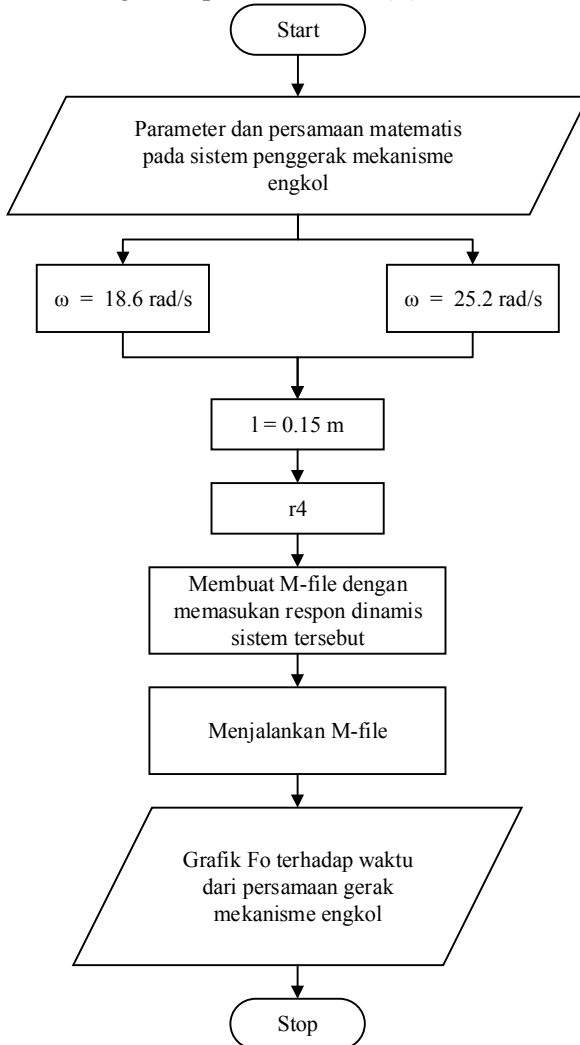
Gambar 3. 7 Diagram alir proses persamaan matematis dari sistem penggerak mekanisme engkol dengan variasi amplitudo 0.01 m dan frekuensi.

- Variasi dengan amplitudo 0.015 m (r_3)



Gambar 3. 8 Diagram alir proses persamaan matematis dari sistem penggerak mekanisme engkol dengan variasi amplitudo 0.015 m dan frekuensi.

- Variasi dengan amplitudo 0.02 m (r_4)



Gambar 3. 9 Diagram alir proses persamaan matematis dari sistem penggerak mekanisme engkol dengan variasi amplitudo 0.02 m dan frekuensi.

3.4.3 Analisa Grafik Sistem Penggerak Mekanisme Engkol

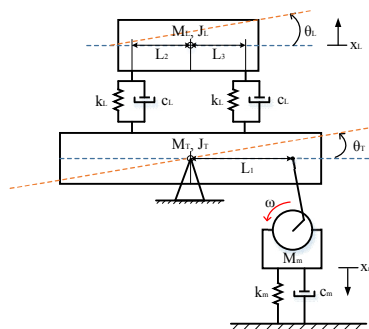
Dari simulasi yang telah dilakukan untuk sistem penggerak mekanisme engkol. Akan didapat grafik F_o terhadap waktu, variasi jari-jari *disc* 0.0025 m, 0.005 m, 0.0075 m, dan 0.01 m dengan masing-masing amplitudo diberikan frekuensi 18.6 rad/s dan 25.2 rad/s.

Setelah itu grafik-grafik tersebut dianalisa dan diambil kesimpulan. Hasil dari grafik akan kita lihat gaya maksimal dari masing-masing jari-jari *disc* dengan variasi frekuensi.

3.5 Pemodelan dan Simulasi Rancangan Pemodelan dan Analisis Simulator Gempa Bumi Penghasil Gerak Rotasi

3.5.1 Pemodelan Matematis dan Pembuatan Persamaan Dari Rancangan Pemodelan dan Analisis Simulator Gempa Bumi Penghasil Gerak Rotasi

Pada gambar 3.9 di bawah ini memnunjukkan model rancangan alat uji gempa bumi yang meliputi M_m yaitu massa motor, M_L massa gedung (*load*), M_T massa meja getar (*shaking table*), K_L mewakili konstanta kekakuan dari gedung (*load*), K_m kontanta kekakuan dari motor , C_L yaitu konstanta redaman dari gedung (*load*) dan C_m konstanta redaman dari motor .

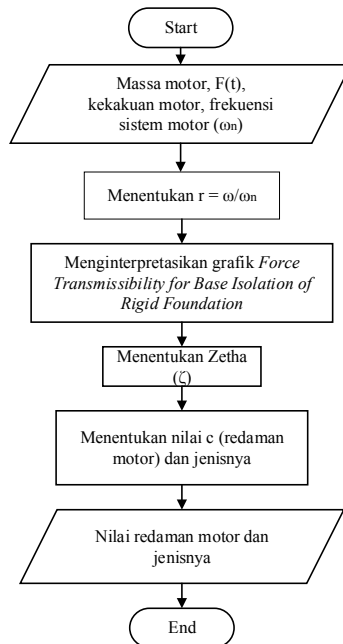


Gambar 3.9 Model matematis dari sistem rancangan pemodelan dan analisis simulator gempa bumi penghasil gerak rotasi

Setelah didapatkan model matematis, maka selanjutnya membuat persamaan gerak dari sistem tersebut. sistem penggerak mekanisme engkol memiliki $F(t)$ yang berbeda-beda tergantung dari hasil variasi amplitudo dan frekuensi.

3.6 Penentuan Redaman pada Motor

Proses selanjutnya adalah penentuan redaman pada motor dengan menggunakan konsep *Base Isolation of Rigid Foundation* yang sudah dijelaskan pada tinjauan pustaka. Tujuan penentuan redaman yang digunakan adalah untuk mengurangi gaya yang ditransmisikan ke lantai. Berikut diagram alir untuk menentukan nilai redaman pada motor,



Gambar 3. 10 Diagram alir menentukan redaman pada motor

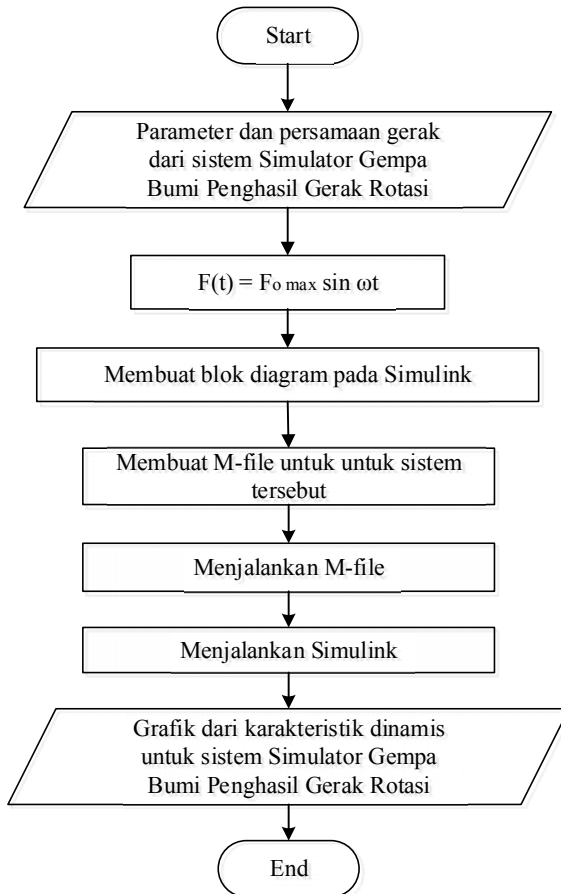
3.5.2 Pembuatan Blok Simulasi Rancangan Simulator Gempa Bumi Penghasil Gerak Rotasi

Setelah mendapatkan persamaan gerak dari sistem, langkah selanjutnya yaitu membuat blok simulasi. Parameter yang digunakan untuk sistem rancangan simulator gempa bumi penghasil gerak rotasi berasal dari data referensi jurnal. Parameter yang digunakan terdapat pada tabel 3.1

Tabel 3. 1 Parameter untuk simulasi sistem rancangan alat uji gempa bumi

Parameter	Nilai	Keterangan
Massa bangunan (<i>load</i>) (M_p)	10 kg, 30 kg, 50 kg	-
Konstanta kekakuan gedung (K_L)	1.02×10^{10} N/m	Berdasarkan jurnal ^[5]
Konstanta redaman gedung (C_L)	2.04×10^9 N.s/m	Berdasarkan jurnal ^[5]
Massa <i>shaking table</i> (M_T)	5.88 kg	-
Massa motor (M_m)	72.5 kg	Perhitungan pada bab 4
Konstanta kekakuan motor (K_m)	814664 N/m	-
Konstanta redaman motor (C_m)	67040.595 N.s/m	Perhitungan pada bab 4
Lebar bangunan dari CG (L_2, L_3)	0.15 m	-
Panjang dari CG ke titik ujung engkol (L_1)	0.3 m	-

Proses pembuatan blok diagram pada Simulink dengan variasi F_0 dijelaskan berupa diagram alir dibawah.



Gambar 3. 11 Diagram alir pembuatan blok diagram Simulink dari sistem simulator gempa bumi penghasil gerak rotasi

3.5.3 Analisa Grafik Rancangan Simulator Gempa Bumi Penghasil Gerak Rotasi Menggunakan Sistem Penggerak Mekanisme Engkol

Dari simulasi sistem rancangan alat uji gempa bumi dengan *input* rotasi menggunakan sistem penggerak mekanisme engkol,

akan didapat respon dinamis berupa perpindahan, kecepatan, maupun percepatan dari *input* $F(t)$ yang akan divariasikan sesuai dengan F_0 dan ω dengan memodifikasi blok diagram pada Simulink. Selanjutnya dilakukan evaluasi dan mengambil kesimpulan dari hasil dari respon dinamis.

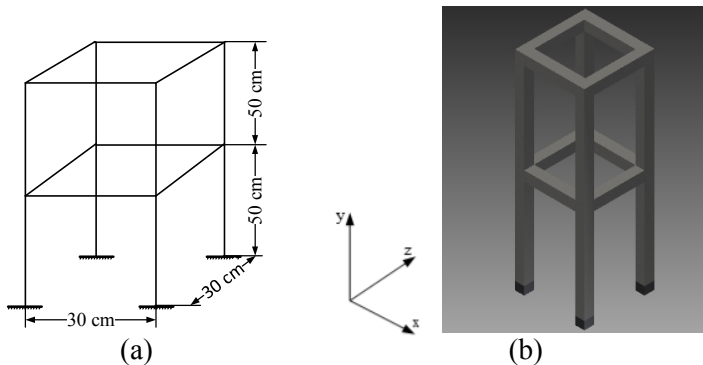
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

PEMODELAN SISTEM

4.1 Dimensi Gedung dan *Shaking Table*

Dimensi gedung yang digunakan pada tugas akhir ini mengikuti referensi ^[3] yang meliputi panjang, lebar, tinggi, dan bahan yang digunakan pada rangka gedung. Dari dimensi tersebut, akan dibuat gambar 3D pada *software* inventor yang digunakan untuk mendapatkan moment inersia polar dan letak *center of gravity*. Berikut dimensi rangka gedung dan gambar 3D yang sudah dibuat,



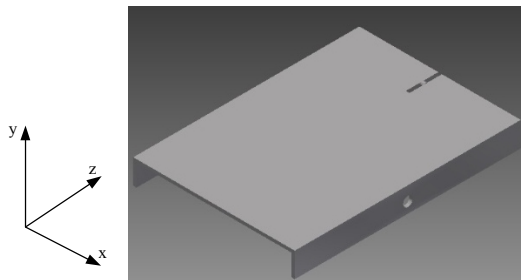
Gambar 4. 1 (a) Dimensi gedung, (b) 3D pada Inventor

Dari hasil *running* pada Inventor dengan menggunakan bahan baja^[3] didapatkan nilai moment inersia polar dan *center of gravity* pada setiap masing-masing variasi massa 10 kg, 30 kg, dan 50 kg. berikut data moment inersia polar dan *center of gravity* pada tabel di bawah ini,

Tabel 4. 1 Nilai moment inersia polar dan *center of gravity* pada gedung

Variasi massa (kg)	Moment Inersia Polar (kg.m ²)	Center of Gravity	
		x (cm)	y (cm)
10	1.1421732	15	56.305
30	3.4265195	15	56.305
50	5.7108658	15	56.305

Dimensi *shaking table* yang digunakan pada tugas akhir ini mengikuti referensi ^[3] yang sedikit dimodifikasi meliputi panjang, lebar tinggi dan bahan yang digunakan pada *shaking table*. Dari dimensi tersebut, akan dibuat gambar 3D pada *software* Inventor yang digunakan untuk mendapatkan moment inersia polar dan letak *center of gravity*. Berikut gambar 3D yang sudah dibuat,

Gambar 4. 2 Gambar 3D *shaking table* pada Inventor

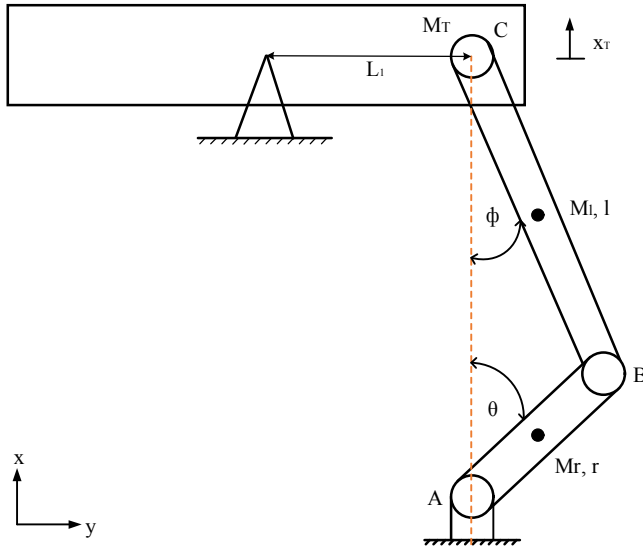
Dari hasil *running* pada Inventor dengan menggunakan bahan baja^[3] didapatkan nilai moment inersia polar dan *center of gravity*. Berikut data moment inersia polar dan *center of gravity* pada tabel di bawah ini,

Tabel 4. 2 Nilai moment inersia polar dan *center of gravity* pada *shaking table*

Moment Inersia Polar (kg.m ²)	Center of Gravity	
	z (cm)	y (cm)
1.0136218	35	1.29

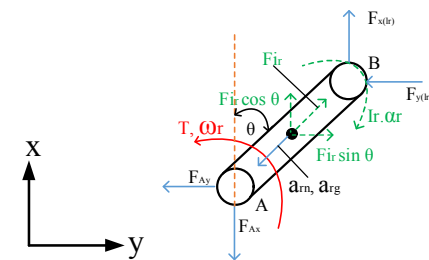
4.2 Pemodelan Dinamis Sistem Mekanisme Engkol

Pemodelan Dinamis sistem mekanisme engkol ini bertujuan untuk mendapatkan gaya mekanisme engkol yang diberikan pada *shaking table*. Berikut sistem dinamis dan FBD mekanisme,



Gambar 4. 3 Pemodelan matematis pada mekanisme engkol

- FBD pada M_r



Gambar 4. 4 Free body diagram pada M_r

Dengan ,

$$\begin{aligned} a_r &= \omega_r^2 \cdot r \\ a_r &= \alpha_r \cdot r = 0 \end{aligned}$$

maka,

$$\begin{aligned} a_r &= \sqrt{a_r^2 + a_r^2} \\ a_r &= a_r \end{aligned} \quad (4.1)$$

Sehingga,

$$F_r = m_r \cdot a_r \quad (4.2)$$

Persamaan gerak translasi,

$$\begin{aligned} +\uparrow \Sigma F_x &= 0 \\ -F_A + F_{x(l_i)} + F_{li} \cos \theta &= 0 \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} +\leftarrow \Sigma F_y &= 0 \\ F_A + F_{y(l_i)} - F_{li} \sin \theta &= 0 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Persamaan gerak rotasi,

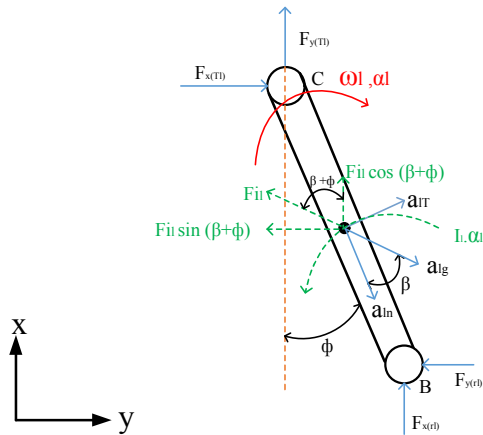
$$\begin{aligned} +\odot \Sigma M_A &= I_r \cdot \alpha_r \\ F_{x(l_i)} \cdot r \sin \theta + F_{y(l_i)} \cdot r \cos \theta - F_{li} \sin \theta \cdot \frac{1}{2} r \cos \theta + \\ F_{li} \cos \theta \cdot \frac{1}{2} r \sin \theta + T &= I_r \cdot \alpha_r \\ F_{x(l_i)} \cdot r \sin \theta + F_{y(l_i)} \cdot r \cos \theta &= -T \\ F_{x(l_i)} \cdot \sin(w) + F_{y(l_i)} \cdot \cos(w) &= -T/r \end{aligned} \quad (4.5)$$

Dimana,

$$\begin{aligned} F_{x(o)} &= \text{Gaya oleh link o kepada link r arah x} \\ F_{x(l_i)} &= \text{Gaya oleh link l kepada link r arah x} \end{aligned}$$

- $F_{y(o)}$ = Gaya oleh link o kepada link r arah y
 $F_{y(l)}$ = Gaya oleh link l kepada link r arah y
 F_{il} = Gaya inersia batang r
 a_r = Percepatan normal batang r
 a_r = Percepatan tangensial batang r
 a_r = Resultan percepatan dari a_r dan a_r
 ω_r = Kecepatan sudut batang r
 T = Torsi motor

- FBD pada M_l



Gambar 4. 5 Free body diagram pada M_l

Dengan ,

$$\omega_l = -\omega_r(r \cos(w))/l \cdot (1 - \frac{r^2}{l^2} \sin^2(w))^{1/2} \quad (4.6)$$

$$\alpha_l = 2(\omega_l^2 \cdot r \sin(w))/l \cdot (1 - \frac{r^2}{l^2} \sin^2(w))^{1/2} \quad (4.7)$$

$$a_{l_i} = \omega_{l_i}^2 \cdot l = (-\omega_r(r \cos(w))/l \cdot (1 - \frac{r^2}{l^2} \sin^2(w))^{\frac{1}{2}}))^2 \cdot l \quad (4.8)$$

$$a_{l'} = \alpha_{l'} \cdot l = 2(\omega_{l'}^2 \cdot r \sin(w))/l \cdot (1 - \frac{r^2}{l^2} \sin^2(w))^{1/2} \cdot l \quad (4.9)$$

maka,

$$a_{l_i} = \sqrt{a_{l_i}^2 + a_{l'}^2} \quad (4.10)$$

sehingga,

$$F_l = m_l \cdot a_{l_i} \quad (4.11)$$

Persamaan gerak translasi,

$$\begin{aligned} +\uparrow \Sigma F_x &= 0 \\ F_{x(T)} + F_{x(r)} + F_{li} \cos(\beta + \phi) &= 0 \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} +\leftarrow \Sigma F_y &= 0 \\ -F_{y(T)} + F_{y(r)} + F_{li} \sin(\beta + \phi) &= 0 \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\beta = \tan^{-1}(a_{l'} / a_{l_i}) \quad (4.14)$$

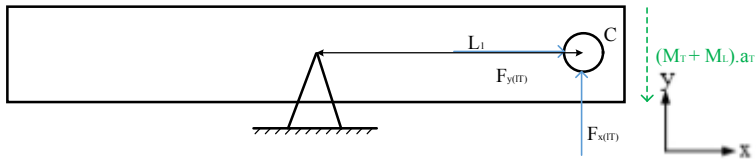
$$\phi = \cos^{-1}(1 - (\frac{r^2}{l^2}) \cdot \sin^2(w)) \quad (4.15)$$

Dimana,

$F_{x(T)}$ = Gaya oleh link T kepada link l arah x
 $F_{x(r)}$ = Gaya oleh link r kepada link l arah x
 $F_{y(T)}$ = Gaya oleh link T kepada link l arah y
 $F_{y(r)}$ = Gaya oleh link r kepada link l arah

- a_{l_i} = Percepatan normal batang l
- $a_{l'_i}$ = Percepatan tangensial batang l
- a_{l_i} = Resultan percepatan dari a_{l_i} dan $a_{l'_i}$
- ω_l = Kecepatan sudut batang l
- α_l = Percepatan sudut batang l

- FBD pada M_T



Gambar 4. 6 Free body diagram pada M_T

Dengan,

$$a_T = r\omega_r^2(\cos(w) + \frac{r}{l} \sin 2(w)) \quad (4.16)$$

Persamaan gerak translasi,

$$\begin{aligned} +\uparrow \Sigma F_x &= m_T \cdot a_T \\ F_{x(l')} &= (m_T + m_L) \cdot a_T \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} +\rightarrow \Sigma F_y &= 0 \\ F_{y(l')} &= 0 \end{aligned} \quad (4.18)$$

Dimana,

- $F_{x(l')}$ = Gaya oleh link l kepada link T arah x
- $F_{y(l')}$ = Gaya oleh link l kepada link T arah y
- m_T = Massa *shaking table*
- m_L = Massa *shaking table*
- a_T = Percepatan *shaking table*

Pada persamaan (4.13),

$$-F_{y(T)} + F_{y(r)} + F_{li} \sin(\beta + \phi) = 0$$

Dimana,

$$F_{y(l)} = F_{y(T)} = 0$$

Sehingga,

$$F_{y(r)} = -F_{li} \sin(\beta + \phi) \quad (4.19)$$

Persamaan (4.19) disubsitusi ke persamaan (4.5),

$$F_{x(l)} = \left(-\frac{T}{r} + F_{li} \sin(\beta + \phi) \cdot \cos(w)\right) / s_i(w) \quad (4.20)$$

Karena $F_{x(l)} = F_{x(r)}$, maka pers (4.20) bisa disubstitusikan ke pers (4.12),

$$F_{x(T)} + \left(-\frac{T}{r} + F_{li} \sin(\beta + \phi) \cdot \cos(w)\right) / s_i(w) + F_{li} \cos(\beta + \phi) = 0$$

$$F_{x(T)} = -\frac{-\frac{T}{r} + F_{li} \sin(\beta + \phi) \cdot \cos(w)}{s_i(w)} - F_{li} \cos(\beta + \phi) \quad (4.21)$$

Karena $F_{x(T)} = F_o$ maka,

$$F_o = \left(-\frac{T}{r} + F_{li} \sin(\beta + \phi) \cdot \cos(w)\right) / s_i(w) - F_{li} \cos(\beta + \phi) \sin(w) \quad (4.22)$$

Sehingga didapatkan input gaya ke *shaking table* menggunakan persamaan (4.22)

4.3 Pengaruh Perubahan Variasi Amplitudo terhadap Jari-Jari *Disc*

Adanya variasi amplitudo pada *shaking table* akan berpengaruh pada dimensi mekanisme engkol. Sehingga dengan berubahnya variasi amplitudo, maka akan berubah pula dimensinya. Disini variasi mekanisme engkol yang berubah adalah jari-jari *disc* (r) dan panjang *connecting rod* konstan.

- Contoh perhitungan dengan variasi amplitudo = 5 mm

$$x_T = r + l - r \cos \theta - l \cos \phi \quad (2.8)$$

$$0.005 = r + 0.15 - r \cos 180 - 0.15 \cos 0$$

$$0.005 = r + 0.15 - r(-1) - 0.15(1)$$

$$0.005 = 2r$$

$$r = 0.0025 \text{ m}$$

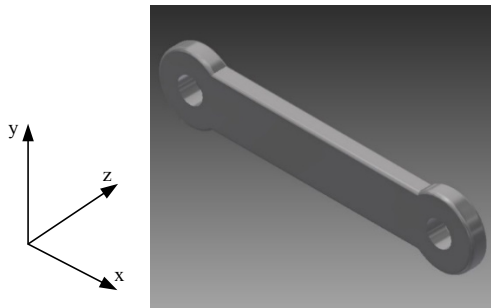
Sehingga dapat disimpulkan bahwa panjang jari-jari *disc* bernilai setengah dari panjang amplitudo. Maka untuk variasi amplitudo 10 mm, 15 mm, dan 20 mm dapat dilihat pada tabel di bawah ini

Tabel 4. 3 Perbandingan nilai r terhadap variasi amplitudo

Variasi Amplitudo (m)	Panjang jari-jari (r) (m)
0.005	0.0025
0.01	0.005
0.015	0.0075
0.02	0.01

4.3.1 Data Gambar *Connecting Rod* pada Inventor

Data gambar meliputi massa dan moment inersia polar pada *connecting rod* yang didapatkan dari *running software* Inventor. Pada referensi panjang *connecting rod* yang digunakan adalah minimal tiga kali panjang jari-jari *disc*, maka panjang yang digunakan pada simulasi sebesar 0.15 m dengan bahan *steel*. Berikut gambar 3D yang sudah dibuat pada Inventor



Gambar 4. 7 Hasil 3D *connecting rod*

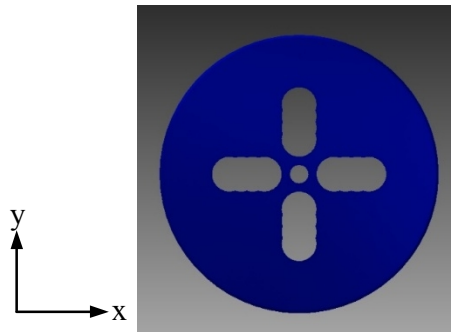
Dari hasil *running* pada Inventor didapatkan nilai moment inersia polar dan *center of gravity*. Berikut data moment inersia polar dan *center of gravity* pada tabel di bawah ini,

Tabel 4. 4 Nilai moment inersia polar dan *center of gravity* pada *connecting rod*

Moment Inersia Polar (kg.m ²)	Center of Gravity	
	x (cm)	y (cm)
0.0012914	7.5	0.5

4.3.2 Data Gambar *Disc* pada Inventor

Data gambar meliputi massa dan moment inersia polar pada *disc* yang didapatkan dari *running software* Inventor. Berikut gambar 3D yang sudah dibuat pada Inventor.



Gambar 4. 8 Hasil 3D disc

Dari hasil *running* pada Inventor didapatkan nilai moment inersia polar dan *center of gravity*. Berikut data moment inersia polar dan *center of gravity* pada tabel di bawah ini,

Tabel 4. 5 Nilai moment inersia polar dan *center of gravity* pada disc

Moment Inersia Polar (kg.m ²)	Center of Gravity	
	x (cm)	y (cm)
0.000753558	6	6

4.4 Pengaruh Perubahan Frekuensi Getar terhadap Jari-Jari Disc

Adanya variasi frekuensi getar pada *shaking table* akan berpengaruh pada dimensi mekanisme engkol. Sehingga dengan berubahnya variasi frekuensi getar, maka akan berubah pula dimensinya. Disini variasi mekanisme engkol yang berubah adalah jari-jari disc (r) dan panjang *connecting rod* konstan dengan menggunakan referensi gambar 2.22

- Perhitungan dengan variasi frekuensi getar = 18.6 rad/s
Dari gambar terlihat bahwa nilai maksimum percepatan normal dengan rasio *coupler* sebesar 1.05 dengan $l/r \geq 5$, maka didapat:

$$\omega_2^2 \cdot r = 1.05$$

$$r = 1.05/18.6^2$$

$$r = 0.003 \text{ m}$$

- Perhitungan dengan variasi frekuensi getar = 25.2 rad/s
Dari gambar terlihat bahwa nilai maksimum percepatan normal sebesar 1.05 dengan rasio *coupler* $l/r \geq 5$, maka didapat:

$$\omega_2^2 \cdot r = 1.05$$

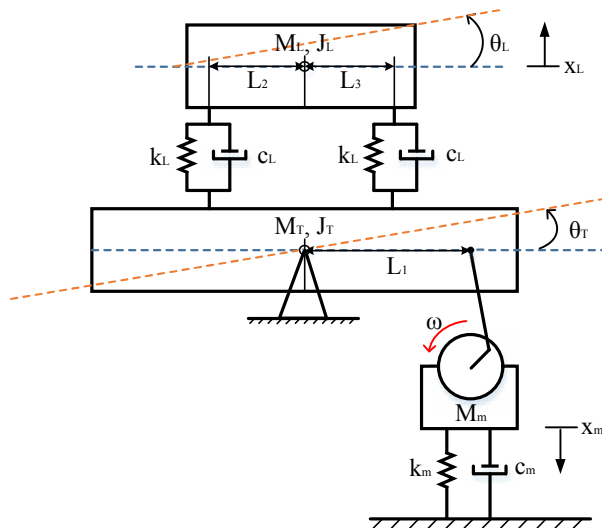
$$r = 1.05/25.2^2$$

$$r = 0.001 \text{ m}$$

Dari hasil perhitungan di atas, dapat dilihat bahwa semakin besar frekuensi getar/frekuensi motor yang digunakan, maka semakin kecil nilai jari-jari *disc*.

4.5 Pemodelan Dinamis Sistem Simulator Gempa Bumi

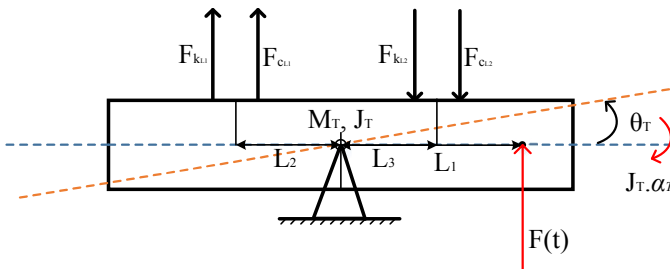
Untuk Permodelan simulator gempa bumi ini menggunakan penggerak motor yang ditransmisikan oleh mekanisme engkol untuk memberikan input gaya pada *shaking table*.



Gambar 4. 9 Model matematis dari sistem rancangan pemodelan dan analisis simulator gempa bumi penghasil gerak rotasi

Berdasarkan gambar 4.9 lalu dibuat persamaan *free body diagram* dan *state variable* yang akan digunakan dalam pembuatan blok diagram dan simulasi. Berikut *free body diagram* dan *state variable* pada setiap massa,

- FBD pada M_T



Gambar 4. 10 Free body diagram pada M_T

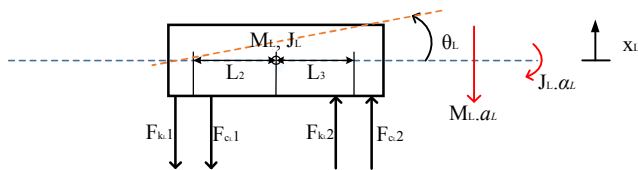
Persamaan gerak rotasi :

$$\begin{aligned}
 +\mathcal{U} \Sigma M &= J_T \cdot \ddot{\theta}_T \\
 -F_{c2} \cdot L_3 - F_{c1} \cdot L_2 - F_{k2} \cdot L_3 - F_{k1} \cdot L_2 + F_{(t)} \cdot L_1 \\
 &= J_T \cdot \ddot{\theta}_T \\
 -J_T \cdot \ddot{\theta}_T - F_{c2} \cdot L_3 - F_{c1} \cdot L_2 - F_{k2} \cdot L_3 - F_{k1} \cdot L_2 \\
 &= -F_{(t)} \cdot L_1 \\
 J_T \cdot \ddot{\theta}_T + F_{c2} \cdot L_3 + F_{c1} \cdot L_2 + F_{k2} \cdot L_3 + F_{k1} \cdot L_2 &= F_{(t)} \cdot L_1 \\
 J_T \cdot \ddot{\theta}_T + C_L(\dot{x}_T - \dot{x}_L)L_3 + C_L(\dot{x}_T - \dot{x}_L)L_2 + K_L(x_T - \\
 x_L)L_3 + K_L(x_T - x_L)L_2 &= F_{(t)} \cdot L_1 \\
 J_T \cdot \ddot{\theta}_T + C_L(\dot{\theta}_T \cdot L_3 - \dot{\theta}_L \cdot L_3)L_3 + C_L(\dot{\theta}_T \cdot L_2 - \dot{\theta}_L \cdot L_2)L_2 + \\
 K_L(\theta_T \cdot L_3 - \theta_L \cdot L_3)L_3 + K_L(\theta_T \cdot L_2 - \theta_L \cdot L_2)L_2 &= F_{(t)} \cdot L_1 \\
 J_T \cdot \ddot{\theta}_T + C_L(\dot{\theta}_T - \dot{\theta}_L)L_3^2 + C_L(\dot{\theta}_T - \dot{\theta}_L)L_2^2 + \\
 K_L(\theta_T - \theta_L)L_3^2 + K_L(\theta_T - \theta_L)L_2^2 &= F_{(t)} \cdot L_1
 \end{aligned}
 \tag{4.23}$$

Persamaan *state variable* dari persamaan (4.23),

$$\begin{aligned}
 \dot{\theta}_T &= \omega_T \\
 \dot{\omega}_T &= -\frac{1}{J_T} [C_L(\omega_T - \omega_L)L_3^2 + C_L(\omega_T - \omega_L)L_2^2 + \\
 &\quad K_L(\theta_T - \theta_L)L_3^2 + K_L(\theta_T - \theta_L)L_2^2 - \\
 &\quad F_{(t)} \cdot L_1]
 \end{aligned}
 \tag{4.24}$$

- FBD pada M_L



Gambar 4. 11 *Free body diagram* pada M_L

Persamaan gerak translasi :

$$\begin{aligned}
 +\uparrow \Sigma F &= M_L \cdot \ddot{x}_L \\
 -F_{c\ 1} + F_{c\ 2} - F_{k\ 1} + F_{k\ 2} &= M_L \cdot \ddot{x}_L \\
 -C_L(\dot{x}_T - (\dot{x}_L - \dot{\theta}_L \cdot L_2)) + C_L(\dot{x}_T - (\dot{x}_L + \dot{\theta}_L \cdot L_3)) - \\
 K_L(x_T - (x_L - \theta_L \cdot L_2)) + K_L(x_T - (x_L + \theta_L \cdot L_3)) &= \\
 M_L \cdot \ddot{x}_L \\
 -C_L \dot{\theta}_L \cdot L_2 - C_L \dot{\theta}_L \cdot L_3 - K_L \theta_L \cdot L_2 - K_L \theta_L \cdot L_3 &= M_L \cdot \ddot{x}_L \\
 M_L \cdot \ddot{x}_L + C_L \cdot L_2 \cdot \dot{\theta}_L + C_L \cdot L_3 \cdot \dot{\theta}_L + K_L \cdot L_2 \cdot \theta_L + K_L \cdot L_3 \cdot \theta_L &= \\
 0
 \end{aligned}$$

(4.25)

Persamaan gerak rotasi :

$$\begin{aligned}
 +\curvearrowright \Sigma M &= J_L \cdot \ddot{\theta}_L \\
 F_{c\ 2} \cdot L_3 + F_{c\ 1} \cdot L_2 + F_{k\ 2} \cdot L_3 + F_{k\ 1} \cdot L_2 &= J_L \cdot \ddot{\theta}_L \\
 -J_L \cdot \ddot{\theta}_L + C_L(\dot{x}_T - (\dot{x}_L + \dot{\theta}_L \cdot L_3))L_3 + C_L(\dot{x}_T - \\
 (\dot{x}_L - \dot{\theta}_L \cdot L_2))L_2 + K_L(x_T - x_L)L_3 + K_L(x_T - (x_L - \\
 \theta_L \cdot L_2))L_2 &= 0 \\
 -J_L \cdot \ddot{\theta}_L + (C_L \cdot L_3 + C_L \cdot L_2)\dot{x}_T - (C_L \cdot L_3 + C_L \cdot L_2)\dot{x}_L + \\
 (K_L \cdot L_3 + K_L \cdot L_2)x_T - (K_L \cdot L_3 + K_L \cdot L_2)x_L &= 0 \\
 J_L \cdot \ddot{\theta}_L - (C_L \cdot L_3 + C_L \cdot L_2)\dot{x}_T + (C_L \cdot L_3 + C_L \cdot L_2)\dot{x}_L - \\
 (K_L \cdot L_3 + K_L \cdot L_2)\theta_T \cdot L_2 + (K_L \cdot L_3 + K_L \cdot L_2)x_L &= 0
 \end{aligned}$$

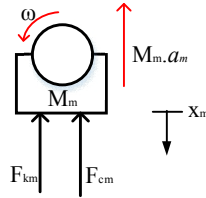
(4.26)

Persamaan *state variable* dari persamaan (4.25) dan (4.26),

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_L &= v_L \\
 \ddot{x}_L &= \frac{1}{M_L} [C_L \cdot L_2 \cdot \dot{\theta}_L + C_L \cdot L_3 \cdot \dot{\theta}_L + K_L \cdot L_2 \cdot \theta_L + \\
 K_L \cdot L_3 \cdot \theta_L & \quad \quad \quad (4.27)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_L &= \omega_L \\ \ddot{\omega}_L &= \frac{1}{J_L} [(C_L \cdot L_3 + C_L \cdot L_2)v_T - (C_L \cdot L_3 + C_L \cdot L_2)v_L + \\ & (K_L \cdot L_3 + K_L \cdot L_2)\theta_T \cdot L_2 - (K_L \cdot L_3 + K_L \cdot L_2)x_L] \quad (4.28)\end{aligned}$$

- FBD pada M_m



Gambar 4. 12 *Free body diagram* pada M_m

Persamaan gerak translasi :

$$\begin{aligned}+\downarrow \Sigma F &= M_m \cdot \ddot{x}_m \\ -F_k - F_c + F \sin \omega &= M_m \cdot \ddot{x}_m \\ F_o \sin \omega &= M_m \cdot \ddot{x}_m + F_c + F_k \\ F_o \sin \omega &= M_m \cdot \ddot{x}_m + c_m \cdot \dot{x}_m + k_m \cdot x_m \quad (4.29)\end{aligned}$$

Persamaan *state variable* dari persamaan (4.30)

$$\begin{aligned}\dot{x}_m &= v_m \\ \dot{v}_m &= \frac{1}{M_m} [c_m \cdot v_m + k_m \cdot x_m - F_o \sin w] \quad (4.30)\end{aligned}$$

Dari data-data yang sudah didapatkan maka dapat dicari frekuensi naturalnya. Untuk mencari frekuensi natural dengan variasi massa gedung maka dilakukan dengan cara sebagai berikut,

- Untuk variasi massa 10 kg

$$\begin{bmatrix} -J_T \cdot \omega^2 + K_L(L_3^2 + L_2^2) & 0 & -K_L(L_3^2 + L_2^2) \\ 0 & -m_L \omega^2 & K_L(L_3 + L_2) \\ K_L(L_3 \cdot L_2 + L_2^2) & K_L(L_3 + L_2) & -J_T \cdot \omega^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_T \\ X_L \\ \theta_L \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.31)$$

$$\begin{bmatrix} -1.142 \cdot \omega^2 + 1,02 \cdot 10^9(0.45) & 0 & -1,02 \cdot 10^9(0.045) \\ 0 & -10 \omega^2 & 1,02 \cdot 10^9(0.3) \\ 1,02 \cdot 10^9(0.045) & 1,02 \cdot 10^9(0.3) & -1.142 \cdot \omega^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_T \\ X_L \\ \theta_L \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Dari matriks di atas didapat persamaan karakteristiknya menjadi :

$$20.164\omega^6 - 65.10^7\omega^4 - 2,2.10^1 \omega^2 + 42,69.10^2 = 0$$

Dan didapat frekuensi naturalnya sebesar :

$$\begin{aligned} \omega_{n1} &= 5037.21 \text{ rad/s} \\ \omega_{n2} &= 6629.47 \text{ rad/s} \\ \omega_{n3} &= 7461 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

- Untuk variasi massa 30 kg

$$\begin{bmatrix} -J_T \cdot \omega^2 + K_L(L_3^2 + L_2^2) & 0 & -K_L(L_3^2 + L_2^2) \\ 0 & -m_L \omega^2 & K_L(L_3 + L_2) \\ K_L(L_3 \cdot L_2 + L_2^2) & K_L(L_3 + L_2) & -J_T \cdot \omega^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_T \\ X_L \\ \theta_L \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -3.427\omega^2 + 1,02 \cdot 10^9(0.45) & 0 & -1,02 \cdot 10^9(0.045) \\ 0 & -30 \omega^2 & 1,02 \cdot 10^9(0.3) \\ 1,02 \cdot 10^9(0.045) & 1,02 \cdot 10^9(0.3) & -3.427\omega^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_T \\ X_L \\ \theta_L \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Dari matriks di atas didapat persamaan karakteristiknya menjadi :

$$351.5\omega^6 - 471,34.10^7\omega^4 - 25,7.10^1 \omega^2 + 42,69.10^2 = 0$$

Dan didapat frekuensi naturalnya sebesar :

$$\begin{aligned}\omega_{n1} &= 3991.40 \text{ rad/s} \\ \omega_{n2} &= 4549.73 \text{ rad/s} \\ \omega_{n3} &= 5291.5 \text{ rad/s}\end{aligned}$$

- Untuk variasi massa 50 kg

$$\begin{bmatrix} -J_T \cdot \omega^2 + K_L(L_3^2 + L_2^2) & 0 & -K_L(L_3^2 + L_2^2) \\ 0 & -m_L \omega^2 & K_L(L_3 + L_2) \\ K_L(L_3 \cdot L_2 + L_2^2) & K_L(L_3 + L_2) & -J_T \cdot \omega^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_T \\ X_L \\ \theta_L \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -5.711\omega^2 + 1.02 \cdot 10^9(0.45) & 0 & -1.02 \cdot 10^9(0.045) \\ 0 & -50 \omega^2 & 1.02 \cdot 10^9(0.3) \\ 1.02 \cdot 10^9(0.045) & 1.02 \cdot 10^9(0.3) & -5.711\omega^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_T \\ X_L \\ \theta_L \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Dari matriks di atas didapat persamaan karakteristiknya menjadi :

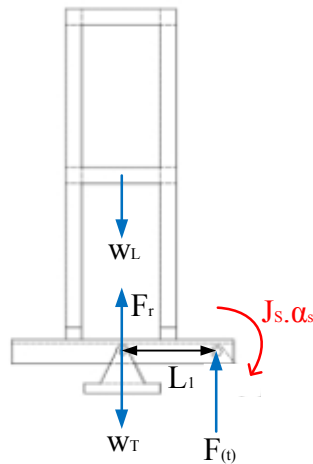
$$1631.34\omega^6 - 1310 \cdot 10^7\omega^4 - 42.95 \cdot 10^1 \omega^2 + 42,69 \cdot 10^2 = 0$$

Dan didapat frekuensi naturalnya sebesar :

$$\begin{aligned}\omega_{n1} &= 2279.09 \text{ rad/s} \\ \omega_{n2} &= 3521 \text{ rad/s} \\ \omega_{n3} &= 4103 \text{ rad/s}\end{aligned}$$

4.6 Perhitungan Daya Motor

Dengan menghitung torsi minimal untuk mengerjakan simulator *shaking table*, akan didapatkan daya motor serta massa motor yang akan juga digunakan untuk menentukan nilai redaman motor. Dasar perhitungan sesuai pada gambar FBD 4.13 dan didapatkan persamaan sebagai berikut



Gambar 4. 13 FBD pada simulator gempa bumi

$$+\circlearrowleft \Sigma M = J_s \cdot \ddot{\theta}_s$$

$$F(t) \cdot L_1 = J_s \cdot \ddot{\theta}_s$$

$$F(t) \cdot L_1 = (J_L + J_T) \cdot r \omega^2 (\cos \omega + \frac{r}{l} \sin 2\omega) / L_1$$

Dimana,

J_s = Momen inersia polar simulator gempa bumi

α_s = Percepatan sudut simulator gempa bumi

Hasil dari simulasi pada percepatan sudut didapat sebesar 6.7738 m/s², maka :

$$F(t) \cdot 0.15 = (5.71 + 1.012) \times 6.7738 / 0.15$$

$$F(t) = 2023.7 \text{ N}$$

Sehingga torsi yang dibutuhkan untuk menggerakkan simulator gempa bumi sebesar :

$$T = F_{(t)} \cdot L$$

$$T = 2023.7 \times 0.15$$

$$T = 303.55 \text{ N.m}$$

Didapat bahwa torsi minimal motor yang dibutuhkan sebesar 303.55 N.m. Jenis motor yang digunakan adalah AC. Dari hasil katalog motor AC^[9] didapatkan data fisik massa = 72.5 kg dengan P = 7.5 kW.

4.7 Perhitungan Redaman Motor

Dengan menggunakan motor sebagai penggerak, maka dibutuhkan redaman yang baik agar umur pemakaiannya jauh lebih lama. Dasar yang digunakan adalah *force transmissibility* pada *base isolation of rigid foundation*. Pertama yaitu menentukan frekuensi natural pada motor sesuai gambar 4.11

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_m}{m_m}}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{814664}{72.5}}$$

$$\omega_n = 106.003 \text{ rad/s}$$

$$r = \frac{\omega}{\omega_n}$$

$$r = \frac{25.2}{106.003} = 0.237$$

Dengan menggunakan persamaan 2.22 dan nilai $\zeta = 0.5$, maka

$$T = \left\{ \frac{1 + (2\zeta_c)^2}{[1 - r^2]^2 + (2\zeta_c)^2} \right\}^{1/2}$$

$$T = \left\{ \frac{1 + (2 \times 0.5 \times 0.2)^2}{[1 - 0.2^2]^2 + (2 \times 0.5 \times 0.2)^2} \right\}^{1/2} = 1.058$$

Setelah didapatkan nilai T , dilanjutkan mencari nilai C

$$T = \frac{(k^2 + \omega^2 c^2)^{1/2}}{[(k - m\omega^2)^2 + \omega^2 c^2]^{1/2}}$$

$$1.058 = \frac{(814664^2 + 25.2^2 c^2)^{1/2}}{[(814664 - 72.5 \times 25.2^2)^2 + 25.2^2 c^2]^{1/2}}$$

$$1.058 = \frac{(814664^2 + 25.2^2 c^2)^{1/2}}{[(814664 - 72.5 \times 25.2^2)^2 + 25.2^2 c^2]^{1/2}}$$

$$1.119 = \frac{6.636 \times 10^1 + 635.04 x c^2}{2.893 \times 10^1 + 635.04 x c^2}$$

$$3.24 \times 10^1 + 710.609 x c^2 = 6.636 \times 10^1 + 635.04 x c^2$$

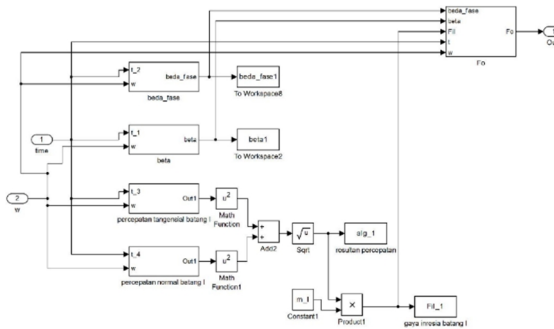
$$75.56 c^2 = 3.396 \times 10^1$$

$$c = 67040.595 \text{ N.s/m}$$

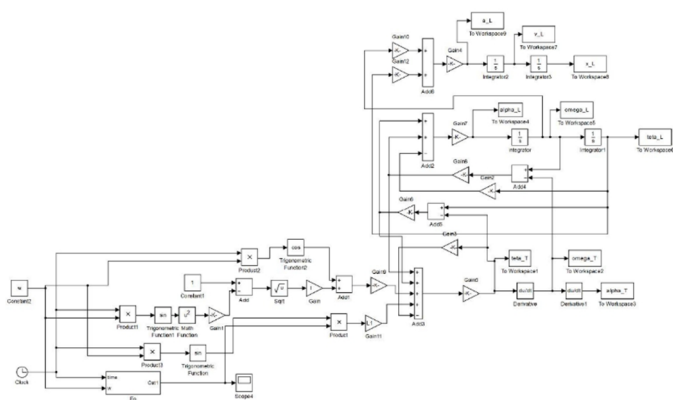
Maka nilai redaman yang dibutuhkan untuk membuat motor aman adalah 67040.595 N.s/m

4.8 Diagram Blok

Untuk melakukan simulasi pada simulator gempa bumi, di bawah ini merupakan blok diagram sistem simulator gempa bumi dan *input* gaya yang diberikan



Gambar 4. 14 Diagram blok pada gaya mekanisme engkol

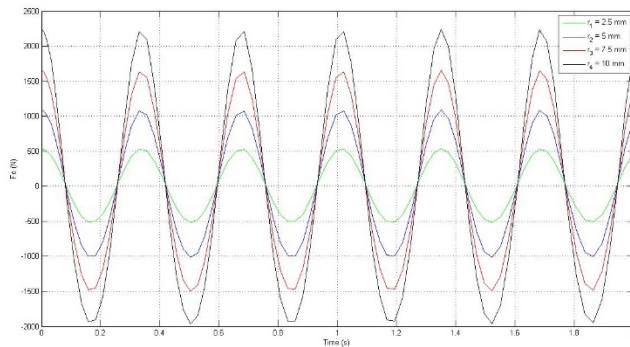


Gambar 4. 15 Diagram blok pada sistem simulator gempa bumi

BAB V ANALISA DAN PEMBAHASAN

5.1 Variasi Kecepatan dan Jari-Jari *Disc* Terhadap *Input* Gaya Mekanisme Engkol

Gaya yang diberikan pada *shaking table* merupakan persamaan F_o dengan fungsi ωt dimana persamaan tersebut didapat dari penjabaran gaya mekanisme engkol yang sudah dijabarkan pada bab 4. Dengan adanya *variable* r dan ω menyebabkan adanya perbedaan hasil *output* gaya yang diberikan ke *shaking table*.



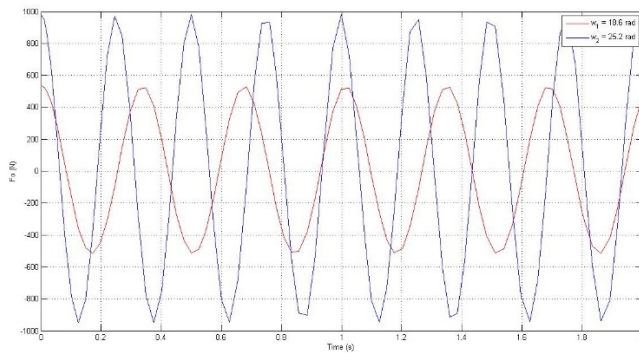
Gambar 5. 1 Grafik F_o dengan variasi jari-jari *disc*

Tabel 5. 1 Nilai F_o dengan variasi nilai r

Variasi nilai r (mm)	F_o (N)	
	min	max
2.5	516.4184	534.5499
5	1015.4	1086.6
7.5	1496.9	1656.2
10	1961	2243.4

Dari gambar di atas merupakan grafik F_o fungsi waktu untuk masing-masing variasi perubahan jari-jari *disc* ($r_1 = 2.5$ mm, $r_2 = 5$ mm, $r_3 = 7.5$ mm) dengan nilai $\omega = 18.6$ rad/s yang disimulasikan selama 2 detik. Terlihat dari grafik masing-masing variasi memiliki pola grafik yang sama.

Dari grafik di atas terlihat bahwa semakin besar nilai r maka semakin besar pula nilai F_o yang didapatkan. Bila dilihat dari persamaan (4.11) maka bisa disimpulkan bahwa nilai r berbanding lurus dengan nilai F_{li} dan selajutnya pada persamaan (4.21) bisa dilihat bahwa nilai F_{li} berbanding lurus dengan nilai F_o . Sehingga bisa dibandingkan bahwa grafik yang dihasilkan sesuai dengan persamaan matematis yang dibuat. Dilihat dari tabel 5.1 dengan nilai $r_1 = 2.5$ mm didapat nilai F_o maksimal sebesar 534.5499 N dan nilai minimumnya sebesar 516.4184 N. Variasi dengan nilai nilai $r_2 = 5$ mm didapat nilai F_o maksimal sebesar 1086.6 N dan nilai minimumnya sebesar 1015.4 N. Variasi dengan nilai nilai $r_3 = 7.5$ mm didapat nilai F_o maksimal sebesar 1496.9 N dan nilai minimumnya sebesar 1656.2 N. Variasi dengan nilai nilai $r_4 = 10$ mm didapat nilai F_o maksimal sebesar 2243.4 N dan nilai minimumnya sebesar 1961 N.



Gambar 5. 2 Grafik F_o dengan variasi frekuensi

Tabel 5. 2 Nilai F_o dengan variasi frekuensi

Variasi frekuensi (rad/s)	F_o (N)	
	min	max
18.6	516.4184	534.5499
25.2	946.234	981.213

Dari gambar (5.2) di atas merupakan grafik F_o fungsi waktu untuk masing-masing variasi perubahan frekuensi ($\omega_1 = 2.5$ rad/s, $\omega_2 = 5$ rad/s) dengan nilai $r = 2.5$ mm yang disimulasikan selama 2 detik. Terlihat dari grafik masing-masing variasi memiliki pola grafik yang sama.

Dari gambar (5.2) di atas terlihat bahwa semakin besar nilai ω maka semakin besar pula nilai F_o yang didapatkan. Pada persamaan (4.21) bisa dilihat bahwa nilai ω berbanding lurus dengan nilai F_o . Sehingga bisa disimpulkan bahwa grafik yang dihasilkan sesuai dengan persamaan matematis yang dibuat. Dilihat dari tabel 5.2 dengan nilai $\omega_1 = 2.5$ rad/s didapat nilai F_o maksimal sebesar 534.5499 N dan nilai minimumnya sebesar 516.4184 N. Variasi dengan nilai $\omega_2 = 5$ rad/s didapat nilai F_o maksimal sebesar 981.213 N dan nilai minimumnya sebesar 946.234 N. Dilihat dari grafik bisa diketahui bahwa dengan variasi frekuensi bukan hanya meningkatkan besar nilai F_o saja, namun juga membuat semakin banyak jumlah gelombang yang terjadi dalam 2 detik.

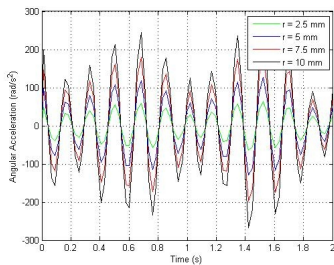
5.2 Respon Dinamis Simulator Gempa Bumi dengan Variasi Jari-Jari *Disc*

Setelah didapatkan nilai F_o dengan variasi nilai jari-jari *disc*, selanjutnya adalah mensimulasikannya ke sistem simulator gempa bumi sebagai input gaya yang bekerja pada simulator dimana $F(t) = F_o \sin \omega t$ dan dikalikan dengan sepanjang L_1 sehingga menjadi *input moment* pada *shaking table* yang sudah dijelaskan pada bab 4. Dari hasil simulasi akan didapatkan respon dinamis berupa percepatan sudut (*angular acceleration*), kecepatan sudut (*angular*

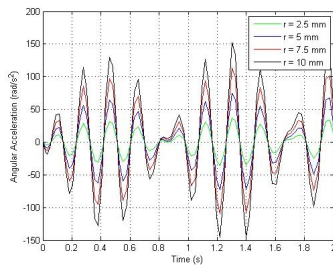
velocity), perpindahan sudut (*angular displacement*) pada *shaking table* dan percepatan sudut (*angular acceleration*), kecepatan sudut (*angular velocity*), perpindahan sudut (*angular displacement*), percepatan linear (*linear acceleration*), kecepatan linear (*linear velocity*), perpindahan linear (*linear displacement*) pada gedung (*load*).

Tabel 5. 3 Parameter yang digunakan dalam simulasi pada simulator gempa bumi dengan variasi jari-jari *disc*

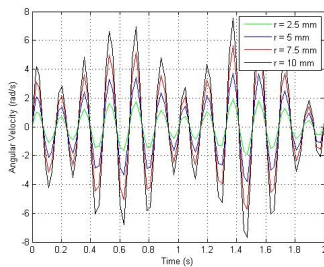
Massa gedung (kg)	Moment inersia polar (kg m ²)	Kecepatan sudut (rad/s)	Jari-jari <i>pulley</i> (m)
10	1.142	18.6	0.0025
			0.005
			0.0075
			0.01



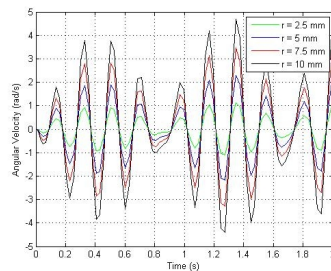
(a)



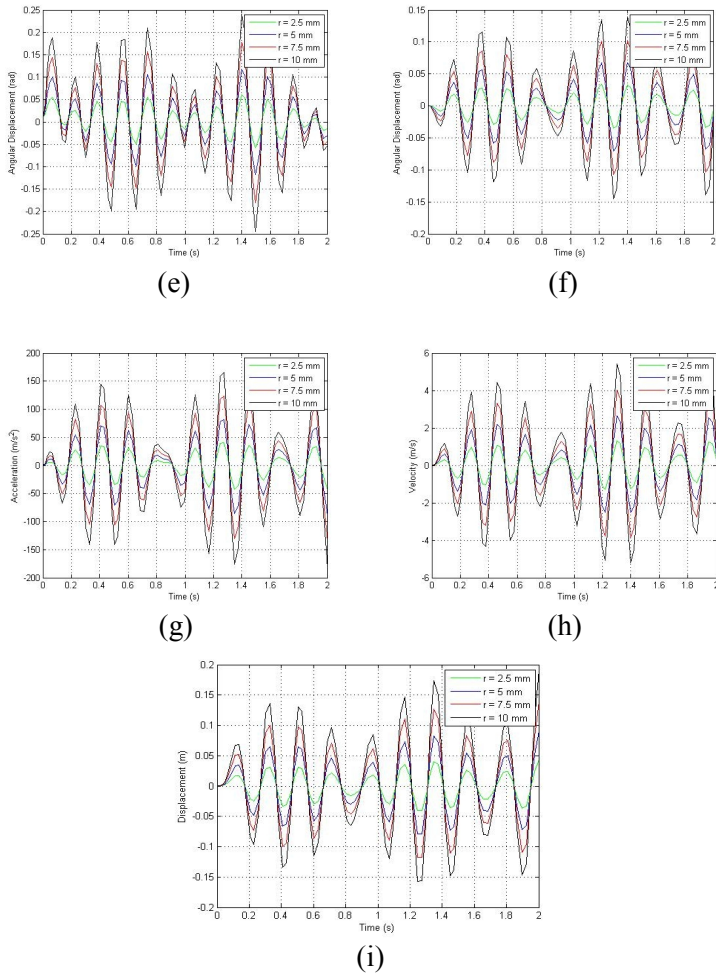
(b)



(c)



(d)



Gambar 5. 3 Grafik respon dinamis pada simulator gempa bumi (a) percepatan sudut *shaking table*, (b) kecepatan sudut *shaking table*, (c) perpindahan sudut *shaking table*, (d) percepatan sudut gedung, (e) kecepatan sudut gedung, (f) perpindahan sudut gedung, (g) percepatan linear gedung, (h) kecepatan linear gedung, dan (i) perpindahan linear gedung dengan variasi jari-jari *disc*

Tabel 5. 4 Respon dinamis pada *shaking table* dengan variasi nilai r

variasi nilai r (m)	<i>shaking table</i> (max/min)		
	alpha (rad/s ²)	omega (rad/s)	teta (rad)
0.0025	63.8093/63.7537	1.93/1.87	0.0603/0.0571
0.005	129.22/126.89	3.83/3.73	0.1182/0.1176
0.0075	197.42/189.27	5.75/5.62	0.1803/0.1779
0.01	268.35/250.93	7.69/7.53	0.2452/0.2395

Tabel 5. 5 Respon dinamis pada gedung dengan variasi nilai r

variasi nilai r (m)	gedung (max/min)					
	alpha (rad/s ²)	omega (rad/s)	teta (rad)	a (m/s ²)	v (m/s)	x (m)
0.0025	37.08/36.39	1.18/1.08	0.0352/0.0338	44.17/40.77	1.31/1.26	0.044/0.041
0.005	74.79/72.73	2.18/2.39	0.071/0.067	89.44/81.67	2.66/2.53	0.0911/0.079
0.0075	113.21/109.19	3.63/3.29	0.1076/0.1027	135.85/123.15	4.05/3.83	0.14/0.11
0.01	152.35/145.79	4.89/4.4	0.145/139	183.42/165.2	5.43/5.2	0.19/0.15

Gambar 5.3 merupakan grafik respon dinamis pada simulator gempa bumi. Pada gambar 5.3 (a - c - e) merupakan respon dinamis percepatan sudut, kecepatan sudut, dan kecepatan sudut *shaking table* secara berurut. Pada gambar 5.3 (b - d - f) merupakan respon dinamis percepatan sudut, kecepatan sudut, dan kecepatan sudut *gedung* secara berurut dan Pada gambar 5.3 (g - h - i) merupakan respon dinamis percepatan linear, kecepatan linear, dan perpindahan linear gedung secara berurut. Setiap respon dinamis yang diamati menggunakan variasi nilai r yaitu 2.5 mm, 5 mm, 7.5 mm, dan 10 mm.

Pada gambar 5.4 terlihat bahwa *trend line* dari setiap respon dinamis gedung maupun *shaking table* sama yaitu semakin besar nilai r , maka semakin besar pula nilai respon dinamis yang didapat. Tabel 5.4 dan 5.5 sudah mencantumkan nilai maksimal dan minimal grafik dari respon dinamis *shaking table* dan gedung. Pada tabel 5.4 menjelaskan nilai maksimal dan minimal *shaking table*. Terlihat dari tabel 5.4 bahwa semakin besar nilai r yang digunakan, maka semakin besar juga percepatan sudut, kecepatan sudut, dan perpindahan sudut pada *shaking table*. Pada tabel 5.5 menjelaskan nilai maksimal dan minimal gedung. Terlihat dari tabel bahwa

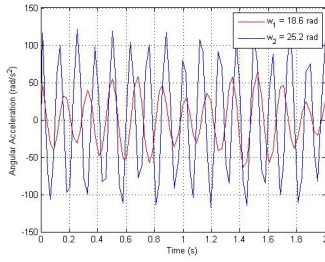
semakin besar nilai r yang digunakan, maka semakin besar juga percepatan sudut, percepatan linear, kecepatan sudut, kecepatan linear, perpindahan sudut dan perpindahan linear pada gedung

5.3 Respon Dinamis Simulator Gempa Bumi dengan Variasi Frekuensi Motor

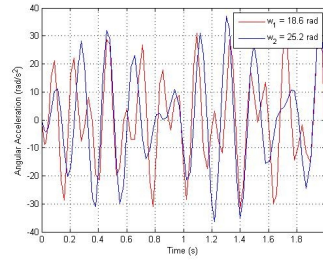
Selanjutnya adalah dengan menggunakan variasi frekuensi Motor. Dari hasil simulasi akan didapatkan respon dinamis berupa percepatan sudut (*angular acceleration*), kecepatan sudut (*angular velocity*), perpindahan sudut (*angular displacement*) pada *shaking table* dan percepatan sudut (*angular acceleration*), kecepatan sudut (*angular velocity*), perpindahan sudut (*angular displacement*), percepatan linear (*linear acceleration*), kecepatan linear (*linear velocity*), perpindahan linear (*linear displacement*) pada gedung (*load*).

Tabel 5. 6 Parameter yang digunakan dalam simulasi pada simulator gempa bumi dengan variasi frekuensi

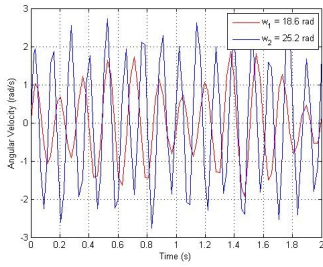
Massa gedung (kg)	Moment inersia polar (kg.m ²)	Jari-jari <i>pulley</i> (m)	Kecepatan sudut (rad/s)
10	1.142	0.0025	18.6
			25.2



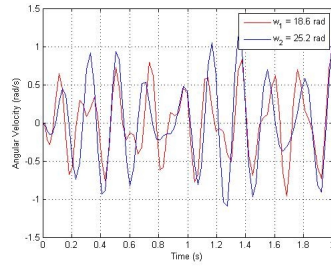
(a)



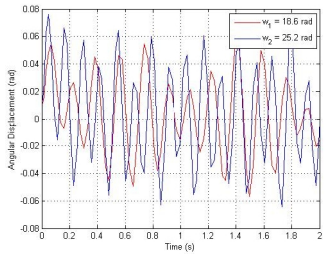
(b)



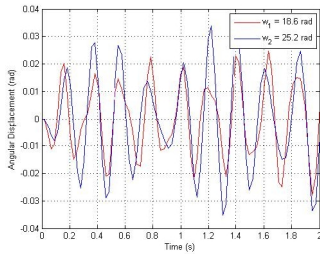
(c)



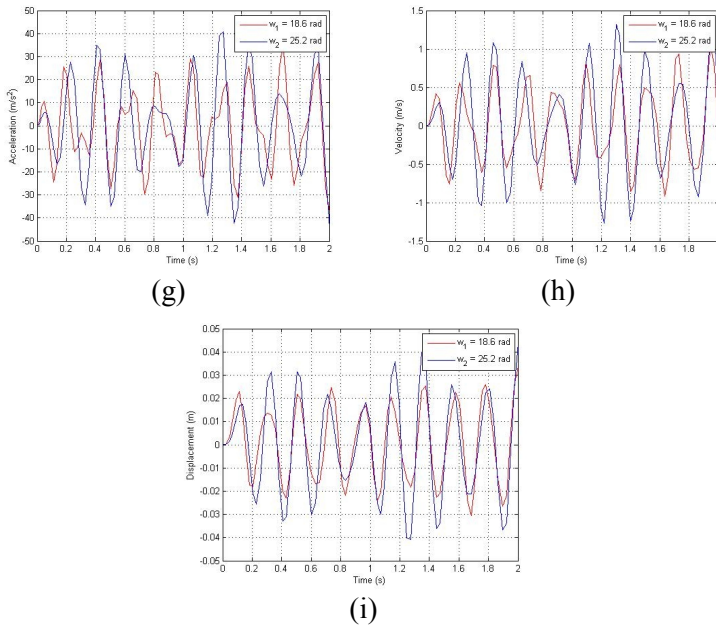
(d)



(e)



(f)



Gambar 5. 4 Grafik respon dinamis pada simulator gempa bumi (a) percepatan sudut *shaking table*, (b) kecepatan sudut *shaking table*, (c) perpindahan sudut *shaking table*, (d) percepatan sudut gedung, (e) kecepatan sudut gedung, (f) perpindahan sudut gedung, (g) percepatan linear gedung, (h) kecepatan linear gedung, dan (i) perpindahan linear gedung dengan variasi frekuensi

Tabel 5. 7 Respon dinamis pada *shaking table* dengan variasi nilai frekuensi

variasi nilai ω (rad/s)	<i>shaking table (max/min)</i>		
	alpha (rad/s ²)	omega (rad/s)	teta (rad)
18.6	63.8093/63.7537	1.93/1.87	0.0603/0.0571
25.2	121.84/117.39	2.7544/2.73	0.076/0.064

Tabel 5. 8 Respon dinamis pada gedung dengan variasi nilai frekuensi

variasi nilai ω (rad/s)	gedung (max/min)					
	alpha (rad/s ²)	omega (rad/s)	teta (rad)	a (m/s ²)	v (m/s)	x (m)
18.6	33.95/31.61	0.99/0.96	0.028/0.025	37.41/35.82	1.047/0.921	0.034/0.031
25.2	37.08/36.39	1.18/1.09	0.035/0.033	44.17/40.77	1.32/1.27	0.044/0.041

Gambar 5.4 merupakan grafik respon dinamis pada simulator gempa bumi. Pada gambar 5.4 (a - c - e) merupakan respon dinamis percepatan sudut, kecepatan sudut, dan kecepatan sudut *shaking table* secara berurut. Pada gambar 5.4 (b - d - f) merupakan respon dinamis percepatan sudut, kecepatan sudut, dan kecepatan sudut *gedung* secara berurut dan pada gambar 5.4 (g - h - i) merupakan respon dinamis percepatan linear, kecepatan linear, dan kecepatan linear gedung secara berurut. Setiap respon dinamis yang diamati menggunakan variasi nilai frekuensi yaitu 18.6 rad/s dan 25.2 rad/s

Pada gambar 5.4 (a - c - e), (b - d - f) dan (g - h - i) terlihat bahwa *trend line* dari setiap respon *shaking table* dan gedung adalah sama. Semakin besar nilai ω , maka semakin besar pula nilai respon dinamis yang didapatkan. Tabel 5.7 dan 5.8 sudah mencantumkan nilai maksimal dan minimal grafik dari respon dinamis *shaking table* dan gedung. Pada tabel 5.7 menjelaskan nilai maksimal dan minimal *shaking table*. Terlihat dari tabel bahwa semakin besar nilai ω yang digunakan, maka semakin besar juga percepatan sudut, kecepatan sudut, dan perpindahan sudut pada *shaking table*. Pada tabel 5.8 menjelaskan nilai maksimal dan minimal gedung. Terlihat dari tabel bahwa semakin besar nilai ω yang digunakan, maka semakin besar juga percepatan sudut, percepatan linear, kecepatan sudut, kecepatan linear, perpindahan sudut dan perpindahan linear pada gedung

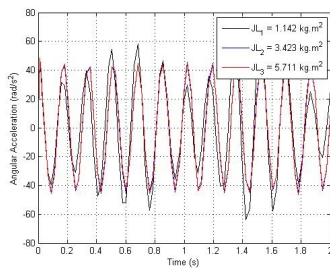
5.4 Respon Dinamis Simulator Gempa Bumi dengan Variasi Massa Gedung

Selanjutnya adalah dengan menggunakan variasi massa pada gedung. Dari hasil simulasi akan didapatkan respon dinamis berupa

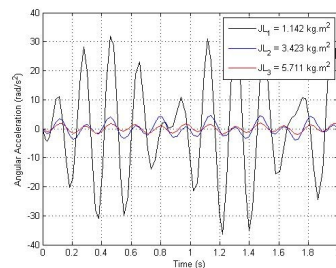
percepatan sudut (*angular acceleration*), kecepatan sudut (*angular velocity*), perpindahan sudut (*angular displacement*) pada *shaking table* dan percepatan sudut (*angular acceleration*), kecepatan sudut (*angular velocity*), perpindahan sudut (*angular displacement*), percepatan linear (*linear acceleration*), kecepatan linear (*linear velocity*), perpindahan linear (*linear displacement*) pada gedung (*load*).

Tabel 5. 9 Parameter yang digunakan dalam simulasi pada simulator gempa bumi dengan variasi massa gedung

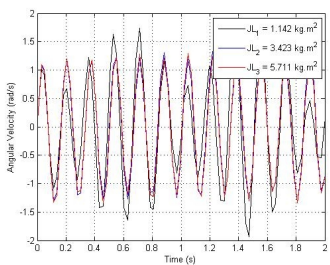
Jari-jari <i>pulley</i> (m)	Kecepatan sudut (rad/s)	Massa gedung (kg)	Moment inersia polar (kg.m ²)
0.0025	18.6	10	1.142
		30	3.427
		50	1.019



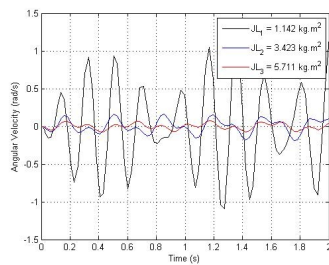
(a)



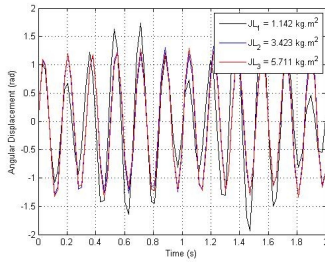
(b)



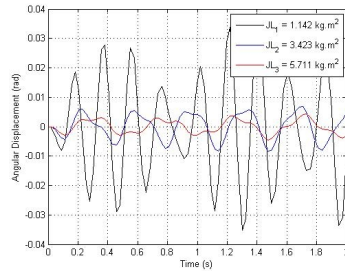
(c)



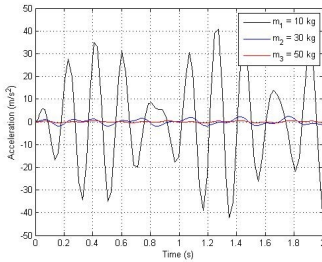
(d)



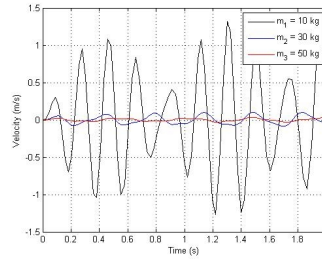
(e)



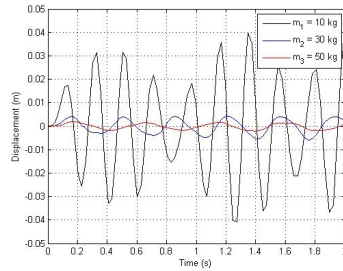
(f)



(g)



(h)



(i)

Gambar 5. 5 Grafik respon dinamis pada simulator gempa bumi(a) percepatan sudut *shaking table*, (b) kecepatan sudut *shaking table*, (c) perpindahan sudut *shaking table*, (d) percepatan sudut gedung, (e) kecepatan sudut gedung, (f) perpindahan sudut gedung, (g) percepatan linear gedung, (h) kecepatan linear gedung, dan (i) perpindahan linear gedung dengan variasi massa gedung

Tabel 5. 10 Respon dinamis pada *shaking table* dengan variasi massa gedung

variasi nilai JL (kg.m ²)	<i>shaking table (max/min)</i>		
	alpha (rad/s ²)	omega (rad/s)	teta (rad)
1.1421	63.81/63.75	1.93/1.87	0.06/0.057
3.4265	48.21/45.22	1.33/1.32	0.0576/0.039
5.7108	48.35/46.53	1.33/1.29	0.059/0.036

Tabel 5. 11 Respon dinamis pada gedung dengan variasi massa gedung

variasi nilai JL (kg.m ²)	gedung (max/min)					
	alpha (rad/s ²)	omega (rad/s)	teta (rad)	a (m/s ²)	v (m/s)	x (m)
1.1421	37.08/36.39	1.18/1.09	0.035/0.033	44.17/40.77	1.32/1.27	0.044/0.041
3.4265	4.62/3.79	0.19/0.16	0.0083/0.0069	2.35/2	0.1/0.087	0.006/0.0043
5.7108	2.8/2.01	0.0762/0.0743	0.0044/0.0043	0.57/0.56	0.033/0.032	0.0021/0.0019

Gambar 5.5 merupakan grafik respon dinamis pada simulator gempa bumi. Pada gambar 5.4 (a - c - e) merupakan respon dinamis percepatan sudut, kecepatan sudut, dan kecepatan sudut *shaking table* secara berurut. Pada gambar 5.4 (b - d - f) merupakan respon dinamis percepatan sudut, kecepatan sudut, dan kecepatan sudut *gedung* secara berurut dan pada gambar 5.4 (g - h - i) merupakan respon dinamis percepatan linear, kecepatan linear, dan kecepatan linear gedung secara berurut. Setiap respon dinamis yang diamati menggunakan variasi nilai massa gedung yaitu 10 kg, 30 kg, dan 50 kg

Pada gambar 5.4 (a - c - e) terlihat bahwa *trend line* dari setiap grafik adalah sama namun disini terlihat bahwa dengan adanya perubahan variasi massa gedung tidak begitu berpengaruh dengan respon dinamis percepatan sudut, kecepatan sudut dan perpindahan sudut *shaking table*, namun berbeda pada gambar (b - d - f) dan (g - h - i). Pada gambar tersebut memiliki trend line grafik yang sama, namun dengan adanya perubahan massa gedung menyebabkan terjadi perubahan grafik. Semakin besar nilai massa gedung, maka semakin kecil respon dinamis gedung yang meliputi percepatan sudut, percepat linear, kecepatan sudut, kecepatan

linear, perpindahan sudut dan perpindahan linear. Tabel 5.10 dan 5.11 sudah mencantumkan nilai maksimal dan minimal grafik dari respon dinamis *shaking table* dan gedung. Pada tabel 5.10 menjelaskan nilai maksimal dan minimal *shaking table*. Terlihat dari tabel bahwa tidak adanya peningkatan yang mencolok dengan penambahan massa gedung terhadap percepatan sudut, kecepatan sudut, dan perpindahan sudut pada *shaking table*. Pada tabel 5.11 menjelaskan nilai maksimal dan minimal gedung. Terlihat dari tabel bahwa semakin nilai massa gedung yang digunakan, maka semakin kecil juga percepatan sudut, percepatan linear, kecepatan sudut, kecepatan linear, perpindahan sudut dan perpindahan linear yang dialami oleh gedung.

5.5 Kompilasi Hasil

Dari grafik-grafik yang sudah didapatkan dilakukan kompilasi hasil dari grafik tersebut dan dapat diketahui nilai *root mean square* (RMS) untuk masing-masing variasi panjang jari-jari *disc* dan massa gedung. RMS ini digunakan untuk mencari rata-rata grafik yang sudah didapatkan dan dengan RMS diketahui seberapa besar pengaruh dari perubahan panjang jari-jari *disc* dan frekuensi serta massa gedung dengan frekuensi. Dari grafik RMS ini juga dapat diketahui seberapa besar perbandingannya dengan frekuensi natural, sehingga diketahui berapa besar frekuensi kerja yang aman untuk digunakan.

Tabel 5. 12 Nilai RMS pada *shaking table* dengan variasi massa gedung =10 kg, $r = 2.5$ mm

ω	<i>shaking table</i>		
	α (rad/s ²)	ω (rad/s)	θ (rad)
0	0	0	0
5	0.5917	0.061	0.0088
10	5.4167	0.2692	0.0151
18.6	32.561	0.9387	0.029
20	39.5039	1.0809	0.031
25.2	77.3951	1.6609	0.0375
30	127.9495	2.3866	0.0468

Tabel 5. 13 Nilai RMS pada *shaking table* dengan variasi massa gedung =10 kg, $r = 5$ mm

ω	<i>shaking table</i>		
	α (rad/s ²)	ω (rad/s)	θ (rad)
0	0	0	0
5	1.1641	0.1121	0.0136
10	10.8084	0.5339	0.0285
18.6	65.4186	1.8729	0.0565
20	79.4535	2.1564	0.0604
25.2	154.4352	3.3403	0.0745
30	255.8309	4.7876	0.0926

Tabel 5. 14 Nilai RMS pada *shaking table* dengan variasi massa gedung =10 kg, $r = 7.5$ mm

ω	<i>shaking table</i>		
	α (rad/s ²)	ω (rad/s)	θ (rad)
0	0	0	0
5	1.7475	0.1647	0.0188
10	16.1739	0.7988	0.042
18.6	98.34	2.8167	0.0845
20	119.4617	3.2419	0.0906
25.2	230.6163	5.0203	0.1123
30	384.3717	7.1816	0.1398

Tabel 5. 15 Nilai RMS pada *shaking table* dengan variasi massa gedung =10 kg, $r = 10$ mm

ω	<i>shaking table</i>		
	α (rad/s ²)	ω (rad/s)	θ (rad)
0	0	0	0
5	2.3336	0.218	0.0242
10	21.7294	1.0684	0.0555
18.6	131.546	3.7674	0.1128
20	159.8148	4.3341	0.1213
25.2	310.2043	6.7211	0.1503
30	513.4406	9.6099	0.1867

Tabel 5. 16 Nilai RMS pada gedung dengan variasi massa gedung =10 kg, $r = 2.5 \text{ mm}$

ω	gedung					
	$\alpha \text{ (rad/s}^2\text{)}$	$\omega \text{ (rad/s)}$	$\theta \text{ (rad)}$	$a \text{ (m/s}^2\text{)}$	$v \text{ (m/s)}$	$x \text{ (m)}$
0	0	0	0	0	0	0
5	0.1772	0.0071	0.0004	0.2676	0.0152	0.0023
10	2.3965	0.0882	0.0034	3.2896	0.1273	0.0055
18.6	18.1796	0.5708	0.0175	16.551	0.4852	0.0157
20	16.4674	0.4875	0.015	21.1859	0.6496	0.0215
25.2	16.3096	0.4401	0.0125	18.1144	0.5549	0.018
30	21.1107	0.5302	0.0159	20.5077	0.5976	0.02

Tabel 5. 17 Nilai RMS pada gedung dengan variasi massa gedung =10 kg, $r = 5 \text{ mm}$

ω	gedung					
	$\alpha \text{ (rad/s}^2\text{)}$	$\omega \text{ (rad/s)}$	$\theta \text{ (rad)}$	$a \text{ (m/s}^2\text{)}$	$v \text{ (m/s)}$	$x \text{ (m)}$
0	0	0	0	0	0	0
5	0.3626	0.0143	0.0007	0.5351	0.0288	0.0032
10	5.0122	0.1816	0.007	6.7592	0.2597	0.0109
18.6	36.2706	1.1372	0.0349	42.579	1.3095	0.0433
20	32.9006	0.9761	0.0301	36.6975	1.1277	0.0366
25.2	33.2695	0.9098	0.0259	35.1348	1	0.0335
30	41.2113	1.0103	0.0301	39.5808	1.1693	0.0384

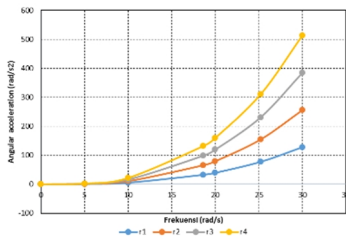
Tabel 5. 18 Nilai RMS pada gedung dengan variasi massa gedung =10 kg, $r = 7.5 \text{ mm}$

ω	gedung					
	$\alpha \text{ (rad/s}^2\text{)}$	$\omega \text{ (rad/s)}$	$\theta \text{ (rad)}$	$a \text{ (m/s}^2\text{)}$	$v \text{ (m/s)}$	$x \text{ (m)}$
0	0	0	0	0	0	0
5	0.5539	0.0217	0.0011	0.811	0.0428	0.0043
10	8.1779	0.2861	0.011	10.6957	0.405	0.0167
18.6	54.7769	1.7214	0.0529	64.4014	1.9828	0.0657
20	49.8308	1.4824	0.0458	55.8243	1.7142	0.0559
25.2	51.3418	1.379	0.0409	54.7176	1.5737	0.0528
30	65.5983	1.6733	0.0514	63.9287	1.962	0.0636

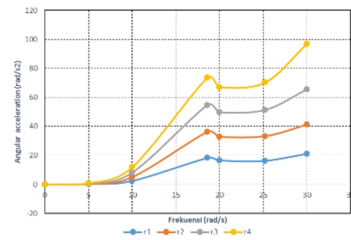
Tabel 5. 19 Nilai RMS pada gedung dengan variasi massa gedung =10 kg, $r = 10 \text{ mm}$

ω	gedung					
	$\alpha \text{ (rad/s}^2\text{)}$	$\omega \text{ (rad/s)}$	$\theta \text{ (rad)}$	$a \text{ (m/s}^2\text{)}$	$v \text{ (m/s)}$	$x \text{ (m)}$
0	0	0	0	0	0	0
5	0.7537	0.0293	0.0015	1.0982	0.0571	0.0055
10	11.8235	0.4111	0.0154	15.2753	0.579	0.0229
18.6	73.5651	2.3158	0.0712	86.7977	2.6692	0.0889
20	67.117	2.0024	0.062	75.3288	2.3303	0.0757
25.2	70.2259	1.9766	0.0575	75.7591	2.1893	0.0731
30	96.9519	2.5276	0.0823	96.2487	3.0728	0.0981

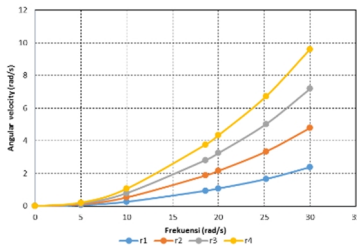
Setelah didapatkan nilai *root mean square* dari masing-masing grafik respon berupa percepatan sudut, percepatan linear, kecepatan sudut, kecepatan linear, perpindahan sudut dan perpindahan linear, maka di buat grafik perbandingan dengan variasi panjang *disc* berdasarkan tabel 5.12 sampai tabel 5.19



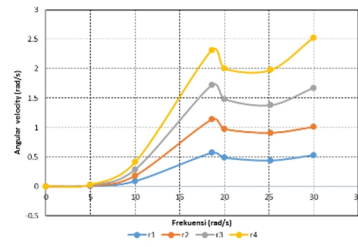
(a)



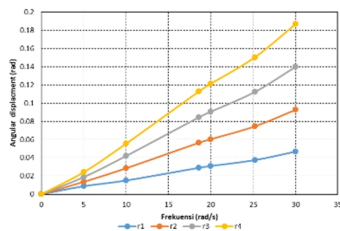
(b)



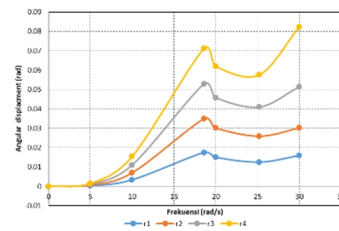
(c)



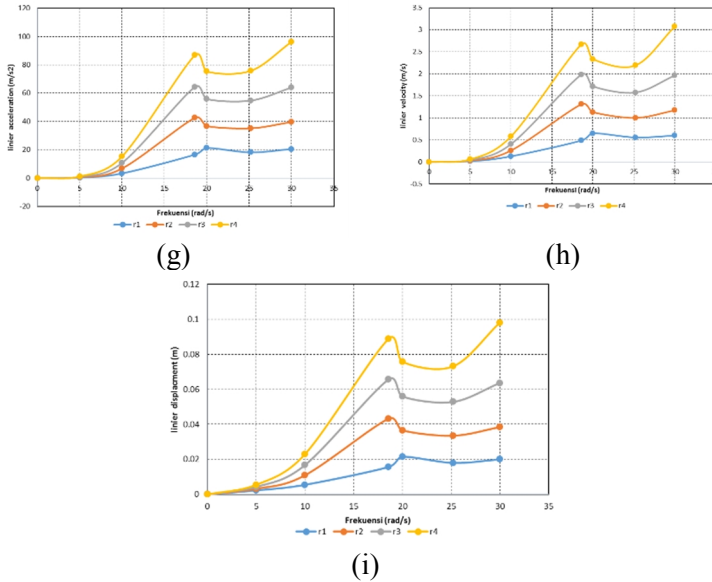
(d)



(e)



(f)



Gambar 5. 6 Grafik *root mean square* dari respon dinamis simulator gempa bumi (a) percepatan sudut *shaking table*, (b) kecepatan sudut *shaking table*, (c) perpindahan sudut *shaking table*, (d) percepatan sudut gedung, (e) kecepatan sudut gedung, (f) perpindahan sudut gedung, (g) percepatan linear gedung, (h) kecepatan linear gedung, dan (i) perpindahan linear gedung dengan variasi nilai r

Gambar 5.6 merupakan grafik *root mean square* (RMS) dari respon dinamis pada simulator gempa bumi. Pada gambar 5.6 (a - c - e) merupakan *root mean square* (RMS) dari respon dinamis percepatan sudut, kecepatan sudut, dan kecepatan sudut *shaking table* secara berurut. Pada gambar 5.6 (b - d - f) merupakan *root mean square* (RMS) dari respon dinamis percepatan sudut, kecepatan sudut, dan kecepatan sudut gedung secara berurut dan pada gambar 5.6 (g - h - i) merupakan *root mean square* (RMS) dari respon dinamis percepatan linear, kecepatan linear, dan kecepatan linear gedung secara berurut. Setiap *root mean square*

(RMS) respon dinamis yang diamati menggunakan variasi nilai r yaitu 2.5 mm, 5 mm, 7.5 mm, dan 10 mm dengan fungsi frekuensi.

Dari grafik di atas pada gambar 5.6 (a - c - e) dapat dilihat bahwa untuk grafik *root mean square* (RMS) terhadap frekuensi dengan variasi r memiliki *tren* yang selalu meningkat setiap frekuensinya. Pada frekuensi 5 rad/s, setiap grafik *root mean square* dengan variasi r masing-masing memiliki nilai RMS yang saling berimpit, dimana bisa dikatakan memiliki nilai yang hampir sama. Namun setelah frekuensinya melebihi dari 5 rad/s, nilai RMS menjadi semakin besar dan juga memiliki selisih RMS yang besar pula. sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin besar frekuensi dan r yang digunakan, maka semakin besar juga nilai RMS yang dihasilkan. Lalu pada gambar 5.6 (b - d - f) dan (g - h - i) memiliki *tren* yang sama dengan grafik *shaking table* yaitu selalu meningkat setiap frekuensinya. Pada frekuensi 5 rad/s, setiap grafik *root mean square* dengan variasi r masing-masing memiliki nilai RMS yang saling berimpit, dimana bisa dikatakan memiliki nilai yang hampir sama. Namun setelah frekuensinya melebihi dari 5 rad/s, nilai RMS menjadi semakin besar dan juga memiliki selisih RMS yang besar pula. Namun pada frekuensi 18.6 rad/s, nilai RMS mengalami penurunan di setiap grafik RMSnya, lalu meningkat kembali.

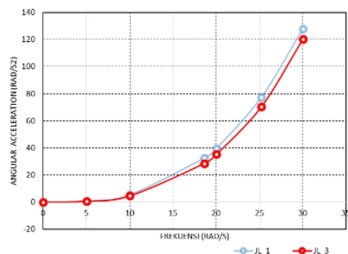
Setelah didapatkan grafik perbandingan dengan variasi panjang *disc* berdasarkan tabel 5.12 sampai tabel 5.19, selanjutnya adalah perbandingan grafik dengan variasi dengan menggunakan tabel 5.12 dan 5.16 dengan tabel di bawah ini.

Tabel 5. 20 Nilai RMS pada *shaking table* dengan variasi massa gedung =50 kg, $r = 2.5$ mm

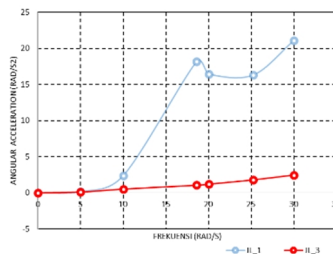
ω	<i>shaking table</i>		
	α (rad/s ²)	ω (rad/s)	θ (rad)
0	0	0	0
5	0.5799	0.0621	0.0088
10	4.5176	0.2366	0.0138
18.6	28.4809	0.8548	0.0271
20	35.1621	1.0111	0.0292
25.2	70.2611	1.6258	0.0405
30	120.1399	2.3329	0.0474

Tabel 5. 21 Nilai RMS pada gedung dengan variasi massa gedung =50 kg, $r = 2.5$ mm

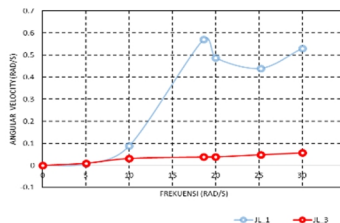
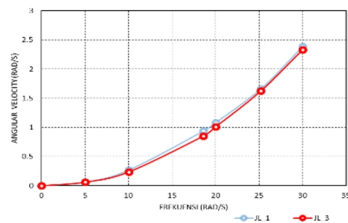
ω	gedung					
	α (rad/s ²)	ω (rad/s)	θ (rad)	a (m/s ²)	v (m/s)	x (m)
0	0	0	0	0	0	0
5	0.2272	0.0189	0.0016	0.1414	0.0123	0.0012
10	1.0426	0.0631	0.0042	0.4671	0.0308	0.0021
18.6	2.0968	0.0712	0.004	0.5339	0.0308	0.0021
20	2.3826	0.0742	0.0043	0.5659	0.0332	0.0023
25.2	3.6112	0.0947	0.0054	0.7249	0.0419	0.0031
30	4.9577	0.1185	0.0068	0.8443	0.0452	0.0041

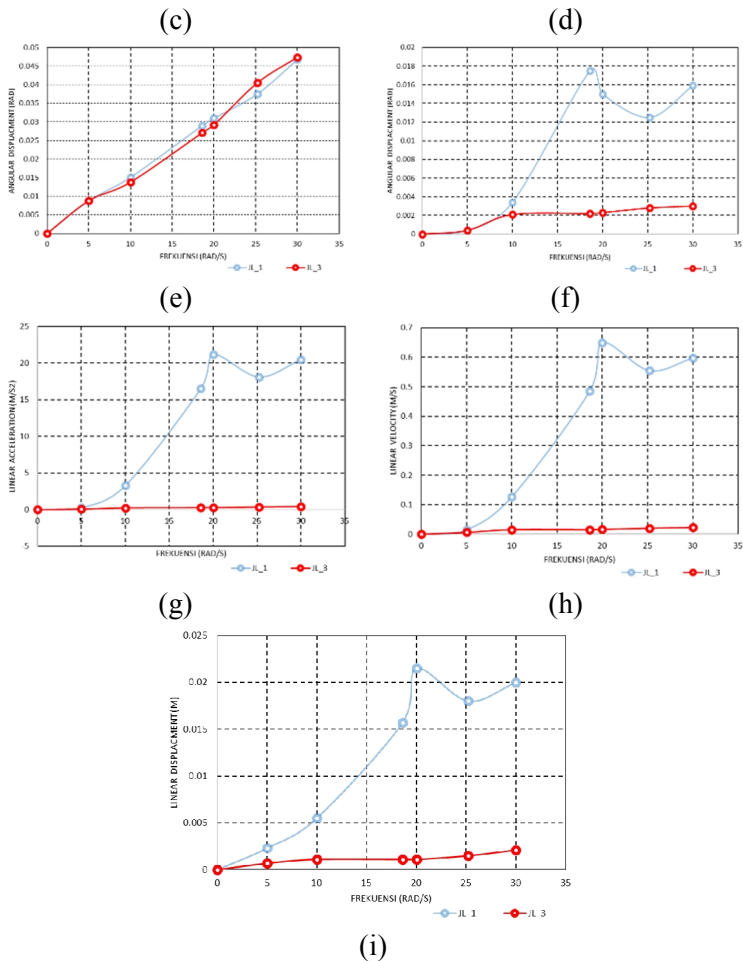


(a)



(b)





(i)

Gambar 5. 7 Grafik *root mean square* dari respon dinamis simulator gempa bumi (a) percepatan sudut *shaking table*, (b) kecepatan sudut *shaking table*, (c) perpindahan sudut *shaking table*, (d) percepatan sudut gedung, (e) kecepatan sudut gedung, (f) perpindahan sudut gedung, (g) percepatan linear gedung, (e) kecepatan linear gedung, dan (f) perpindahan linear gedung dengan variasi massa gedung

Gambar 5.7 merupakan grafik *root mean square* (RMS) dari respon dinamis pada simulator gempa bumi. Pada gambar 5.7 (a - c - e) merupakan *root mean square* (RMS) dari respon dinamis percepatan sudut, kecepatan sudut, dan kecepatan sudut *shaking table* secara berurut. Pada gambar 5.4 (b - d - f) merupakan *root mean square* (RMS) dari respon dinamis percepatan sudut, kecepatan sudut, dan kecepatan sudut gedung secara berurut dan pada gambar 5.4 (g - h - i) merupakan *root mean square* (RMS) dari respon dinamis percepatan linear, kecepatan linear, dan kecepatan linear gedung secara berurut. Setiap *root mean square* (RMS)

Dari grafik di atas pada gambar 5.7 (a - c - e) dapat dilihat bahwa untuk grafik *root mean square* (RMS) terhadap frekuensi dengan variasi massa gedung memiliki *tren* yang selalu meningkat setiap frekuensinya. Dari grafik juga dapat dilihat bahwa antara grafik untuk variasi massa gedung JL_1, JL_2, dan JL_3 berhimpit sehingga perubahan massa gedung tidak begitu mempengaruhi respon yang dihasilkan oleh *shaking table*. Bila dibandingkan dengan teori matematis, dilihat pada persamaan (4.24) bahwa nilai massa pada gedung tidak berpengaruh pada *shaking table*. Sehingga dapat disimpulkan bahwa secara teori dan simulasi sama yaitu massa gedung tidak berpengaruh terhadap respon dinamis *shaking table* dan juga kesimpulan lain yang bisa diambil adalah *shaking table* bekerja dengan baik karena tidak terpengaruh oleh massa gedung. Hasil grafik juga memberikan penjelasan bahwa pada kejadian nyata *shaking table* sebagai representasi gempa bumi dimana besar gempa bumi tidak terpengaruh terhadap massa gedung yang diguncang. Lalu pada gambar 5.6 (b - d - f) dan (g - h - i) memiliki *tren* yang sama dengan grafik *shaking table* yaitu selalu meningkat setiap frekuensinya. Pada grafik RMS variasi JL_1 selalu diatas dari grafik-grafiknya yang lain. Pada frekuensi 25.2 rad/s mengalami tren menurun pada grafik RMS nya, lalu kembali meningkat terhadap frekuensi. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin kecil massa gedung yang digunakan,

maka semakin besar juga nilai RMS percepatan sudut, percepatan linear, kecepatan sudut, kecepatan linear, perpindahan sudut dan perpindahan linear gedung yang dihasilkan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa yang telah dilakukan pada simulator gempa bumi penghasil gerak rotasi dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Adanya perubahan dimensi mekanisme engkol dengan variasi amplitudo 5 mm, 10 mm, 15 mm, dan 20 mm terhadap panjang jari-jari *disc* masing-masing sebesar 2.5 mm, 5 mm, 7.5 mm, dan 10 mm. Pada variasi frekuensi getar/frekuensi motor didapatkan jari-jari *disc* sebesar 0.003 m dan 0.001 m
2. Nilai redaman yang dibutuhkan agar gaya yang ditransmisikan ke lantai bernilai kecil adalah sebesar 67040.595 N.s/m.
3. Hasil respon dinamis pada *shaking table* berupa percepatan sudut, kecepatan sudut, dan kecepatan sudut dengan variasi jari-jari *disc* didapatkan bahwa semakin besar nilai r , maka semakin besar pula respon dinamis yang didapatkan. Pada respon dinamis gedung berupa percepatan sudut, percepatan sudut, perpindahan sudut, percepatan linear, kecepatan linear dan perpindahan linear dengan variasi jari-jari *disc* didapatkan bahwa semakin besar nilai r , maka semakin besar pula respon dinamis yang didapatkan. Lalu dengan variasi frekuensi motor didapatkan respon dinamis pada *shaking table* berupa percepatan sudut, kecepatan sudut, dan kecepatan sudut bahwa semakin besar nilai ω , maka semakin besar pula respon yang dihasilkan. Pada respon dinamis gedung berupa percepatan sudut, percepatan sudut, perpindahan sudut, percepatan linear, kecepatan linear dan perpindahan linear dengan variasi jari-jari *disc* didapatkan bahwa semakin besar nilai ω , maka semakin besar pula respon dinamis yang didapatkan. Selanjutnya dengan variasi massa gedung didapatkan respon dinamis pada *shaking table*

berupa percepatan sudut, kecepatan sudut, dan kecepatan sudut bahwa variasi m tidak terlalu berpengaruh terhadap respon dinamis yang dihasilkan. Lain halnya dengan respon dinamis pada gedung berupa percepatan sudut, percepatan sudut, perpindahan sudut, percepatan linear, kecepatan linear dan perpindahan linear dengan variasi m , didapatkan bahwa semakin besar nilai m , semakin kecil hasil respon dinamis yang dihasilkan.

4. Pada hasil RMS terlihat bahwa dengan variasi nilai r , grafik RMS pada *shaking table* terlihat semakin besar frekuensi, maka semakin besar nilai RMS yang dihasilkan. Dengan variasi nilai r pada setiap grafik, semakin besar nilai frekuensi, maka semakin besar pula selisih antara grafik setiap variasi. Namun pada grafik RMS gedung, terjadi fenomena dimana pada frekuensi 20 rad/s terjadi penurunan nilai RMS, setelah itu nilai RMS akan cenderung naik kembali.
5. Pada hasil RMS terlihat bahwa dengan variasi massa gedung, grafik RMS *shaking table* terlihat berimpit, sehingga disimpulkan bahwa dengan adanya perubahan massa gedung, tidak akan terjadi perubahan signifikan pada nilai RMS. Ini menunjukkan bahwa secara teori dan simulasi sama yaitu massa gedung tidak berpengaruh terhadap respon dinamis *shaking table*. Namun pada grafik RMS gedung, terjadi perubahan signifikan. Adanya penambahan nilai massa gedung menghasilkan nilai RMS yang semakin kecil. Pada frekuensi 20 rad/s terjadi penurunan nilai RMS pada setiap respon dinamis gedung, namun cenderung naik setelah frekuensi 20 rad/s.

6.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan didapatkan beberapa saran untuk pengembangan dalam penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk mencoba menguji eksperimen simulator gempa bumi penghasil gerak rotasi ini pada setiap jenis variasi untuk memvalidasi simulasi dari hasil matematis permodelan.
2. Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk melakukan pengembangan pada model matematis gedung seperti menambah massa pada setiap lantai sehingga penelitian ini menjadi lebih baik dan bervariasi.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rao, Singiresu S. 2011. **Mechanical Vibrations Fifth Edition**. Miami: Pearson Education, Inc.
- [2] Hibbler, R.C. 2010. **Engineering Mechanics Dynamics**. New Jersey: Pearson Education, Inc.
- [3] Setio, Herlien D.,dkk. 2012. **Pengembangan Sistem Seismik pada Struktur Bangunan yang Dikenai Beban Gempa sebagai Solusi untuk Membatasi Respon Struktur**. Bandung : Institut Teknologi Bandung.
- [4] Bontong, Benyamin, dkk. 2012.**Karakteristik Dinamika Bola Baja sebagai Material Isolasi Seismik**. Palu : Universitas Tadulako.
- [5] Dewi, Fitriana Ariesta, dan Susatio, Yenni Ir. MT. 2013.**Simulasi Peredam Getaran Bangunan dengan Model Empat Tumpuan**. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [6] Pulmmer, A.R. 2015.**Model-base Motion Control for Multi-Axis Servohydraulic Shaking Table**. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [7] Zessar, Faldy dan Wasiwitono, Unggul. 2012. “**Desain dan Analisa Sistem Suspensi Kendaraan Multiguna Pedesaan**”. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [8] Wikipedia. 2015. **Vibration**,<URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Vibration>>
- [9] TECO, 2014, **Standart Motor Catalogue**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Muhammad Fadli Amahoru dilahirkan di Balikpapan, 29 Mei 1994 anak yang terlahir dari orangtua terbaik bernama Ridwan Amahoru dan Deswati. Riwayat pendidikan penulis diawali di SD Patra Dharma 3, Balikpapan pada tahun 2000-2006. Penulis melanjutkan pendidikannya di SMP Patra Dharma 2, Balikpapan pada tahun 2007-2009, kemudian melanjutkan pendidikannya di SMA Negri 1, Balikpapan pada tahun 2009-2012. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan jenjang S-1

Jurusan Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya melalui jalur mandiri.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi selama perkuliahan. Dalam organisasi kemahasiswaan, penulis aktif menjadi staff Departemen Sosial Masyarakat di Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM). Pada tahun 2014-2015, penulis aktif menjadi Ketua Biro Kajian Strategis Departemen Sosial Masyarakat HMM.

Motto hidup penulis adalah “ketika memiliki kemampuan yang lebih, maka akan datang tanggung jawab yang lebih besar” menjadikan penulis lebih bersemangat dan berusaha keras untuk senantiasa memberikan yang terbaik untuk sekitar dan amanah dalam menjalankan tanggung jawab. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email fadliamahoru@gmail.com

“Halaman ini sengaja dikosongkan”